



دانشگاه علوم پزشکی مشهد
معاونت پژوهش و فناوری
۶۰۹



کمیته تحقیقات دانشجویی
معاونت پژوهش و فناوری
دانشگاه علوم پزشکی مشهد



مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی
موثر بر سلامت



تبدیل پسماند مواد غذایی به سوخت سبز: روند و توسعه

By: Neha Srivastava / Maqsood Ahmad Malik

ترجمه

دکتر ضیاء الدین بنیادی

دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط و عضو مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت

محدثه زحمت کش عنبرانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط و عضو کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی مشهد



تبدیل پسماند مواد غذایی به سوخت سبز: روند و توسعه

ترجمه: دکتر ضیاء الدین بنیادی، محدثه زحمت کش عنبرانی



Mashhad University of
Medical Sciences
Vice Chancellor for
Research and Technology
609

تبدیل پسماند مواد غذایی به سوخت سبز: روند و توسعه

*Food Waste to Green Fuel
Trend & Development*

اخیرا میزان پسماند مواد غذایی، پسماند میوه و سبزیجات افزایش چشمگیری داشته است؛ و دفع آنها تهدید جدی برای محیط است. روش های رایج مورد استفاده برای دفع پسماند میوه و سبزیجات شامل سوزاندن، غذا برای دام، تشکیل کمپوست یا تلنبار در محل های دفن زباله می باشد؛ اما دفع پسماند میوه و سبزیجات در محل های دفن زباله باعث بروز مشکلات جدی از جمله انتشار گازهای گلخانه ای، افزایش انتشار عوامل بیماری زا و آلودگی خاک، آب و هوا شده است. برای حل این مسئله به شیوه های مدیریت مواد غذایی سازگار با محیط زیست نیاز است. یکی از این شیوه های مناسب مدیریتی، تبدیل پسماند میوه و سبزیجات به سوخت های زیستی است. تحقیقات زیادی در مورد قابلیت پسماند میوه و سبزیجات برای تولید سوخت زیستی انجام شده و هنوز ادامه دارد. محققان دریافته اند که پسماند میوه و سبزیجات را می توان به سوخت های زیستی، یعنی بیواتانول، هیدروژن زیستی، بیودیزل و بیوگاز تبدیل کرد. پسماندهای میوه و سبزیجات به سادگی و به فراوانی قابل دسترس، و غنی از کربوهیدرات هستند و می توانند به طور طبیعی تجزیه شوند؛ بنابراین، می توانند به عنوان جایگزینی برای سوخت های فسیلی استفاده شوند.

9786003692886



انتشارات دانشگاه
علوم پزشکی مشهد

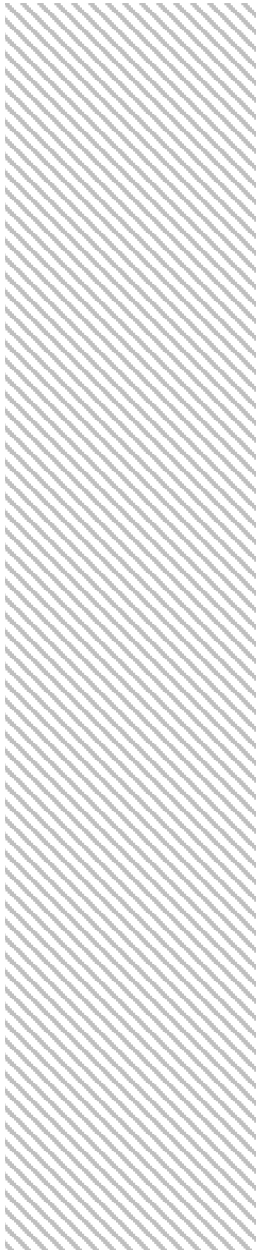
Ziaeddin Bonyadi

Social Determinants of Health Research Center, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

Mohaddeseh zahmatkesh Anbarani

Student Research Committee, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

بناجره



عنوان و نام پدیدآور	: تبدیل پسماند مواد غذایی به سوخت سبز: روند و توسعه / نویسندگان [صحیح: ویراستاران]
مشخصات نشر	: نشر سرواستاوا، مقصود احمد مالک؛ ترجمه ضیاءالدین بنیادی، محدثه زحمتکش عنبرانی.
مشخصات ظاهری	: مشهد: دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۳.
فروست	: ۳۸۰ ص: مصور (رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد؛ ۶۰۹.
وضعیت فهرست نویسی	: ۹۷۸-۶۰۰-۳۶۹-۲۸۸-۶
یادداشت	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: development, 2022 & Food waste to green fuel: trend.
موضوع	: کتابنامه.
	: انرژی زیست توده Biomass energy
	: سوخت حاصل از مواد زاید Waste products as fuel
	: سوخت زباله‌ای Refuse as fuel
شناسه افزوده	: سرواستاوا، نه‌ها، ویراستار
شناسه افزوده	: Srivastava, Neha
شناسه افزوده	: مالک، مقصود احمد، ویراستار
شناسه افزوده	: Malik, Maqsood Ahmad
شناسه افزوده	: بنیادی، ضیاءالدین، ۱۳۶۰- مترجم
شناسه افزوده	: زحمتکش عنبرانی، محدثه، ۱۳۷۷- مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی مشهد. انتشارات
رده بندی کنگره	: TP۳۳۹
رده بندی دیویی	: ۶۶۲/۸۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۹۹۳۱۲۵۸
اطلاعات رکورد کتابشناسی	: فیبا



انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد

تبدیل پسماند مواد غذایی به سوخت سبز:

روند و توسعه

شماره اثر ۶۰۹

ترجمه	دکتر ضیاءالدین بنیادی
	محدثه زحمتکش عنبرانی
طراح جلد	الله نوری
نوبت چاپ	اول، زمستان ۱۴۰۳
قطع	وزیری، ۳۸۰ صفحه
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۳۶۹-۲۸۸-۶
حق چاپ محفوظ است	انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد



دفتر انتشارات:

مشهد، خیابان دانشگاه، جنب سینما
هویزه، ساختمان قریشی، طبقه اول،

گروه نشریات و کتب

مدیریت اطلاع‌رسانی پزشکی
و منابع علمی دانشگاه

۹۱۳۸۸۱۳۹۴۴ | ص. پ

۰۵۱-۳۸۴۵۱۵۳۶ | تلفن

<http://pub.mums.ac.ir>

pub@mums.ac.ir

تبدیل پسماند مواد غذایی به سوخت سبز: روند و توسعه



ترجمه:

دکتر ضیاء الدین بنیادی

دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط
و عضو مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت

محدثه زحمت کش عنبرانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط
و عضو کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی مشهد

یادداشت ناشر

بسمه تعالی

انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد به عنوان یک نهاد علمی - فرهنگی، چاپ و نشر کتاب‌های مورد استفاده استادان و دانشجویان رشته‌های علوم پزشکی را از وظایف اساسی خود می‌داند و بر آن است تا با انتشار متون مربوط به علوم پزشکی، هم بر اعتبار و اعتلای آن‌ها بیفزاید و هم موجبات دل‌گرمی و شوق و نشاط ایشان در امر تحقیق را فراهم آورد. به یقین چاپ و نشر آثار معتبر علمی، امکان دستیابی اهل تحقیق به منابع مختلف و گوناگون علمی مورد نیاز به بهترین صورت ممکن خواهد ساخت و راه را برای تحقیقات بعدی هموار خواهد کرد.

گسترده‌ی فعالیت‌های ناشران خصوصی، نه تنها از مسئولیت مراکز معتبر دانشگاهی برای کوشش در این زمینه‌ها با تکیه بر جنبه‌های علمی و فرهنگی موضوع نمی‌کاهد، بلکه به دلایل گوناگون از جمله لزوم بررسی‌های دقیق کارشناسی، ویرایش‌های علمی و فنی و نیز توجه بیشتر به توان مالی مخاطبان آثار به ویژه دانشجویان، باید دانشگاه‌های دولتی دامنه خدمات خود را با تکیه بر جنبه‌های کیفی و گاه صرف نظر از بازده اقتصادی گسترش دهند.

مسئولان انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد با اشتیاق و اخلاص تمام می‌خواهند جدیدترین آثار مربوط به دانش‌های پزشکی را به بهترین شیوه فراهم آورند و می‌کوشند تا آثار منتشر شده با کیفیت مطلوب عرضه شود. در عین حال انتشارات مترصد دریافت نظرها و انتقادهای به جا و سازنده اهل نظر است، تا از این طریق بتواند بر کمال آثار منتشره شده خویش بیفزاید.

معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مشهد با استعانت از الطاف خداوندی امیدوار است که نشر این اثر با نظارت همه جانبه این معاونت و با تکیه بر ابتکار و کوشش اعضا و کارشناس دانش‌آموخته خویش، همانند دیگر آثار این انتشارات، موجب ارتباط محکم و پایدار با جامعه پزشکی و دانشجویان پژوهشگر در جهت ارتقای کیفی و تنوع موضوعات مورد نیاز دانش‌پژوهان رشته‌های علوم پزشکی شود و مورد استفاده دانشجویان و مقبول طبع صاحب نظران و دانشگاهیان نکته‌بین قرار بگیرد.

انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد

فهرست مطالب

فصل ۱: استفاده از پسماند مواد غذایی برای تولید سوخت زیستی	۱۱
۱-۱ مقدمه	۱۲
۲-۱ مقدمه	۱۶
۳-۱ ویژگی‌های پسماند مواد غذایی	۱۷
۴-۱ تولید سوخت‌های زیستی	۱۹
۱-۴-۱ تولید بیودیزل از پسماند مواد غذایی	۱۹
۲-۴-۱ تولید بیواتانول از پسماند غذایی	۲۳
۳-۴-۱ تولید هیدروژن و متان از پسماند مواد غذایی	۲۵
۵-۱ اقتصاد سوخت زیستی از زباله‌های مواد غذایی	۲۶
۶-۱ کاربردهای پسماند غذایی از صنایع مختلف	۲۹
۷-۱ مزایای سوخت‌های زیستی از پسماند مواد غذایی	۳۲
۸-۱ معایب سوخت‌های زیستی ناشی از پسماند مواد غذایی	۳۳
۹-۱ چالش‌ها	۳۴
۱-۹-۱ صنعت سازمان نیافته	۳۴
۲-۹-۱ تفکیک پسماند مواد غذایی	۳۴
۳-۹-۱ منبع تجدید ناپذیر	۳۵
۴-۹-۱ منبع غیر استاندارد	۳۵
۱۰-۱ چشم انداز آینده	۳۵
۱۱-۱ نتیجه‌گیری	۳۷
منابع	۳۷

فصل ۲: انرژی زیستی و فرآوری پسماند مواد غذایی ۴۳

۱-۲	مقدمه	۴۴
۲-۲	وضعیت کنونی فرآوری پسماند غذا در هند و جهان	۴۶
۱-۲-۲	سوخت‌های زیستی از پسماند پردازش مواد غذایی	۴۹
۳-۲	منابع انرژی زیستی از پسماند مختلف مواد غذایی	۵۳
۱-۳-۲	پسماند غلات و ارزن	۵۳
۲-۳-۲	فرآوری پسماند میوه و سبزیجات	۵۵
۳-۳-۲	فرآوری پسماند لبنیات	۶۰
۴-۲	عوامل موثر بر تولید سوخت‌های زیستی	۶۲
۶۳	منابع	

فصل ۳: از پسماند میوه و سبزیجات تا تولید سوخت زیستی: بخش اول ۶۷

۱-۳	مقدمه	۶۸
۲-۳	تعریف، تولید و تأثیر پسماند مواد غذایی	۷۰
۲-۲-۳	ویژگی‌های پسماند مواد غذایی	۷۳
۳-۲-۳	راه‌های فعلی مدیریت زباله‌های غذایی	۷۴
۳-۳	سوخت‌های زیستی به عنوان منابع انرژی پایدار	۷۵
۴-۳	تولید سوخت زیستی از پسماند میوه و سبزیجات	۷۹
۱-۴-۳	بیواتانول	۸۱
۵-۳	نتیجه گیری	۱۰۶
۱۰۷	منابع	

فصل ۴: از پسماند میوه و سبزیجات تا تولید سوخت زیستی: بخش دوم ۱۱۹

۱-۴	مقدمه	۱۲۰
۲-۴	هیدروژن زیستی	۱۲۴
۱-۲-۴	عوامل موثر بر تولید هیدروژن زیستی	۱۴۱
۳-۴	بیودیزل	۱۴۳
۱-۳-۴	عوامل موثر بر تولید بیودیزل	۱۵۳
۴-۴	بیوگاز	۱۵۵
۵-۴	نتیجه گیری	۱۶۵
۱۶۶	منابع	

فصل ۵: پیشرفت‌های اخیر در تولید بیوگاز از پسماند مواد غذایی..... ۱۸۱

۱-۵	مقدمه.....	۱۸۲
۲-۵	پسماند مواد غذایی.....	۱۸۳
۱-۲-۵	ترکیب پسماند مواد غذایی.....	۱۸۴
۲-۲-۵	اثرات تلبارکردن و دفع زباله‌های مواد غذایی.....	۱۸۴
۳-۲-۵	روش‌های مدیریت زباله برای پسماند مواد غذایی.....	۱۸۶
۳-۵	بیوگاز.....	۱۸۷
۱-۳-۵	نیروهای محرک برای تولید بیوگاز.....	۱۸۹
۲-۳-۵	تولید بیوگاز از پسماند مواد غذایی: دستورالعمل.....	۱۹۰
۴-۵	راکتورهای تولید بیوگاز.....	۱۹۹
۱-۴-۵	راکتورهای بیوگاز معمولی.....	۱۹۹
۲-۴-۵	فن‌آوری‌های نوآورانه راکتور بیوگاز.....	۲۰۰
۵-۵	توالی بای ژن 16S rRNA میکروبی‌های مرتبط با فرآیند برای هضم بی هوازی.....	۲۰۱
۶-۵	صنعت بیوگاز: وضعیت فعلی.....	۲۰۲
۷-۵	توانایی هضم پسماند غذا.....	۲۰۳
۸-۵	تولید بیوگاز - چشم انداز اقتصادی.....	۲۰۴
۱-۸-۵	اقتصاد بیوگاز برای پسماند غذایی.....	۲۰۴
۲-۸-۵	چرخه اقتصاد برای هضم بی هوازی پسماند غذایی.....	۲۰۵
۹-۵	مسائل مربوط به تولید بیوگاز.....	۲۰۵
۱۰-۵	چشم انداز آینده و نتیجه‌گیری.....	۲۰۶
۲۰۷	منابع.....	

فصل ۶: بیوگاز از پسماند آشپزخانه..... ۲۱۷

۱-۶	مقدمه.....	۲۱۸
۲-۶	طبقه بندی سوخت‌های زیستی.....	۲۱۹
۱-۲-۶	ترکیب زباله‌های آشپزخانه.....	۲۲۲
۲-۲-۶	هاضم بیوگاز.....	۲۳۰
۳-۲-۶	موانع در تولید بیوگاز.....	۲۳۱
۳-۶	نتیجه‌گیری.....	۲۳۱
۲۳۱	منابع.....	

فصل ۷: فرآورده‌های فرعی فرآوری مواد غذایی و استفاده از پسماند برای تولید بیواتانول..... ۲۳۵

۲۳۶	۱-۷ مقدمه
۲۳۹	۲-۷ کاربردهای بیواتانول
۲۴۱	۳-۷ تولید بیواتانول
۲۴۲	۱-۳-۷ مواد اولیه بر پایه قند
۲۴۴	۲-۳-۷ مواد اولیه مبتنی بر نشاسته
۲۴۴	۳-۳-۷ مواد اولیه لیگنوسلولزی
۲۴۶	۴-۷ اهمیت استفاده از محصولات فرعی و فرآوری پسماند مواد غذایی برای تولید بیواتانول
۲۴۸	۵-۷ بیواتانول از محصولات فرعی و فرآوری پسماند مواد غذایی
۲۴۸	۷-۵-۷ بیواتانول از سبزیجات و میوه‌ها
۲۴۹	۲-۵-۷ بیواتانول از پسماند موز
۲۵۰	۳-۵-۷ بیواتانول از پسماند مرکبات
۲۵۱	۴-۵-۷ بیواتانول از پسماند میوه خرما
۲۵۲	۵-۵-۷ بیواتانول از فرآوری پسماند سیب زمینی
۲۵۳	۶-۵-۷ بیواتانول از تفاله قهوه و پوسته
۲۵۳	۷-۵-۷ بیواتانول از پسماند غلات
۲۵۵	۸-۵-۷ لبنیات
۲۵۷	۷-۶ نتیجه‌گیری
۲۵۸	منابع

فصل ۸: استفاده از پسماند میوه و سبزیجات به‌عنوان مواد اولیه لیگنوسلولزی برای

تخمیر بیواتانول ۲۶۵

۲۶۶	۱-۸ مقدمه
۲۶۷	۱-۱-۸ پسماند میوه و سبزیجات به عنوان ماده خام برای تولید بیواتانول
۲۷۰	۲-۱-۸ نقش میکروارگانیسم‌ها
۲۷۴	۳-۱-۸ آماده‌سازی و سم زدایی پسماند میوه و سبزیجات
۲۷۹	۴-۱-۸ تولید بیواتانول
۲۸۳	۵-۱-۸ استخراج اتانول با تقطیر
۲۸۳	۲-۸ عوامل موثر بر تخمیر
۲۸۵	۳-۸ اتانول به عنوان سوخت زیستی
۲۸۷	۴-۸ آینده بیواتانول در کشور هند
۲۸۸	۵-۸ نتیجه‌گیری
۲۸۸	منابع

فصل ۹: تولید بیواتانول از پسماند میوه: پیشرفت‌های اخیر ۲۹۵

۱-۹	مقدمه	۲۹۶
۲-۹	مزایای بیواتانول	۳۰۱
۳-۹	وضعیت کنونی	۳۰۴
۴-۹	اتانول به عنوان سوخت زیستی برای انرژی تجدیدپذیر	۳۰۴
۵-۹	اقتصاد بیواتانول	۳۰۶
۶-۹	انواع پسماند میوه	۳۰۸
۷-۹	پسماند میوه (پیش نیاز) مناسب برای تولید اتانول	۳۱۱
۸-۹	آماده سازی پسماند میوه برای تولید اتانول	۳۱۵
۹-۹	تولید اتانول با استفاده از پسماند مختلف میوه	۳۱۸
۱-۹-۹	پرتقال و نارنگی پاکستانی	۳۱۸
۲-۹-۹	نارنگی پاکستانی و پوست موز	۳۲۳
۳-۹-۹	پسماند انبه / موز	۳۲۴
۴-۹-۹	پسماند موز	۳۲۴
۵-۹-۹	پسماند انبه	۳۲۷
۶-۹-۹	پسماند مرکبات	۳۲۷
۷-۹-۹	پسماند چغندر قند	۳۲۹
۸-۹-۹	گوشت سیب	۳۳۰
۹-۹-۹	آناناس	۳۳۱
۱۰-۹-۹	پسماند انگور	۳۳۳
۱۱-۹-۹	روغن نخل	۳۳۳
۱۲-۹-۹	پوست میوه	۳۳۳
۱۳-۹-۹	موز درختی	۳۳۴
۱۴-۹-۹	خریزه درختی	۳۳۴
۱۵-۹-۹	درخت خرما	۳۳۵
۱۶-۹-۹	پسماند میوه‌های مخلوط	۳۳۵
۱۷-۹-۹	میوه رمبوتان	۳۳۶
۱۸-۹-۹	پوست پرتقال	۳۳۶
۱۹-۹-۹	عصاره سیب بادم هندی	۳۳۸
۲۰-۹-۹	آلو جاوه‌ای و انبه	۳۳۸
۱۰-۹	نتیجه‌گیری	۳۳۹
۳۴۰	منابع	

فصل ۱۰: روند تولید بیودیزل از جلبک‌ها و پسماند چربی حیوانی: چالش‌ها و چشم‌اندازها ۳۴۹

۱-۱۰	مقدمه	۳۵۰
۲-۱۰	تولید بیودیزل با استفاده از جلبک	۳۵۲
۳-۱۰	فرآیندهای تولید جلبک و فرآیندهای تبدیل	۳۵۲
۴-۱۰	آماده‌سازی جلبک‌ها برای تولید بیودیزل	۳۵۳
۵-۱۰	استفاده از ریزجلبک‌ها برای تولید بیودیزل	۳۵۴
۶-۱۰	روش‌های استفاده شده برای به‌دست آوردن بیودیزل از جلبک‌ها	۳۵۷
۷-۱۰	تولید بیودیزل با استفاده از پسماند چربی حیوانی	۳۵۸
۸-۱۰	تولید بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون با استفاده از چربی‌های حیوانی	۳۶۱
۹-۱۰	ویژگی‌های بیودیزل حاصل از مواد اولیه حیوانی	۳۶۳
۱۰-۱۰	چالش‌های اصلی و چشم‌اندازهای آینده در تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی و پسماند چربی حیوانی	۳۶۸
۱۱-۱۰	نتیجه‌گیری	۳۷۱

منابع ۳۷۱

استفاده از پسماند مواد غذایی برای تولید سوخت زیستی

چکیده: پسماند مواد غذایی می‌تواند به طور قابل توجهی به عنوان مواد خام برای تولید سوخت زیستی با استفاده از روش‌های مختلف استفاده می‌شود. کربوهیدرات، چربی و سایر مواد مغذی موجود در پسماند مواد غذایی را می‌توان به بیواتانول، بیودیزل، هیدروژن و متان تبدیل کرد. در این فصل، فرآیندهای تولید سوخت‌های زیستی از پسماند مواد غذایی مورد بحث قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت منابع نفتی، تقاضا برای سوخت‌های زیستی در سراسر جهان در حال افزایش است. از این جهت، بیودیزل و بیواتانول محبوب‌ترین سوخت‌های زیستی هستند. از این سوخت‌ها می‌توان به صورت تجاری مورد استفاده قرار گیرند. تولید صنعتی بیودیزل، بیواتانول، هیدروژن و متان از پسماند غذایی می‌تواند برای حل بسیاری از مسائل مانند دفع زباله، کمبود انرژی، آلودگی و در دسترس بودن پسماند مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: پسماند مواد غذایی، بیواتانول، بیودیزل، متان، سوخت زیستی، نفت

۱-۱ مقدمه

محصول جانبی یا پسماند تولید شده در مراحل مختلف زنجیره تامین مواد غذایی مانند: دستگاه‌های پردازش، فرآوری و تامین مواد غذایی از جمله: میوه‌ها، سبزیجات، غلات، مواد خام پخته نشده و مواد غذایی از مکان‌های فروش محصولات تازه و ضایعات مواد غذایی از منازل و رستوران‌ها، را می‌توان پسماند غذایی تعریف کرد (Ong et al. 2018). دورریزی پسماند غذایی چالش‌هایی را ایجاد می‌کند. پسماندهای غذایی هر روز مستقیماً در محل‌های دفن زباله ریخته می‌شوند. تجزیه بیوشیمیایی زباله‌های مواد غذایی منجر به بوی ناخوشایند و تشکیل پسماند نامطلوب و ناسالم می‌شود.

پسماند غذایی به یکی از مسائل مهم اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی تبدیل شده است. پسماند زیستی و بخش‌های آلی پسماندهای جامد شهری مانند پسماند باغچه، آشپزخانه و ضایعات مواد غذایی، یک سوم از کل پسماند را تشکیل می‌دهند؛ و به عنوان یک منابع ارزشمند در نظر گرفته می‌شوند. این منابع ارزشمند می‌توانند به محصولات مفید تبدیل شوند. ترکیب پسماند غذایی همیشه یکنواخت نبوده؛ و بسته به فصل منطقه، زمان برداشت و عادات غذایی جمعیت آن منطقه، تغییرات قابل توجهی را نشان می‌دهد. ترکیب کلی پسماند غذایی در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

اگرچه دفن زباله‌های غذایی در محل‌های دفن زباله به عنوان یکی از روش‌های ساده و اقتصادی دفع در نظر گرفته می‌شود؛ اما غیرقابل قبول و ناسازگار با محیط زیست است. در این زمینه، مدیریت بهتر محصولات غذایی در صنایع غذایی و رستوران‌ها بدون شک به کاهش مقدار زباله‌های غذایی تولید شده کمک می‌کند. در حال حاضر، فناوری‌های مختلفی برای استفاده از زباله‌های غذایی مانند؛ (۱) کمپوست کردن زباله‌های غذایی، (۲) تهیه خوراک دام و (۳) تولید بیوگاز وجود دارد. این فناوری‌ها برای استفاده بهینه پسماند غذایی به کار گرفته می‌شوند (Karmee 2016).

بیوگاز، شامل سوخت، چوب، زغال چوب و فضولات دام است. بیوگاز به عنوان یک منبع اساسی انرژی در بسیاری از مناطق جهان استفاده می‌شود. انرژی زیستی مهم‌ترین منبع انرژی برای پخت و پز بیشتر جمعیت جهان است که در فقر شدید زندگی می‌کنند. امروزه، پیشرفت‌های بیشتر و فناوری‌های پیشرفته‌تر امکان استخراج سوخت‌های زیستی به صورت

مایع یا گازی از منابعی مانند چوب، محصولات کشاورزی و مواد پسماند را فراهم می‌کنند (The State of Food and Agriculture 2008).

جدول ۱-۱. ترکیب کلی پسماند مواد غذایی

اجزاء	درصد وزنی به وزنی
مواد محلول	۳۳/۸۱
نشاسته	۱۰/۶۸
گلوکز	۴/۳۹
سلولز	۱۰/۳۱
همی سلولز	۱۱/۳۲
فروکتوز	۳/۴۷
ساکارز	۴/۳۸
پکتین	۳/۲۷
مجموع قندهای احیا کننده ^۱	۱۲/۵۴
پروتئین	۰/۵۴
چربی	۱۱/۹۱
لیگنین	۶/۷۵
خاکستر	۵/۱۶

پسماند غذایی به طور گسترده در سراسر جهان به سادگی در مکان‌های دفن تلبار یا سوزانده شده، بدون آنکه از راه‌های دیگر استفاده شوند. پسماند غذایی با ترکیبات مختلف، منبعی غنی از کربوهیدرات‌ها، قندها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و چربیها و برخی از مواد معدنی اصلی و جزئی می‌باشند. پسماند غذایی برای تولید سوخت‌های زیستی از طریق تبدیل میکروبی یا آنزیمی مناسب می‌باشند. از بین این پسماند، مقادیر کربوهیدرات در پسماند مواد غذایی در کشور هند حداکثر است (Shakharkar 2018). مدیریت پسماند مواد غذایی به کاهش نسبی وابستگی به نفت خام به عنوان یک منبع انرژی کمک می‌کند.

۱. مجموع قندهای احیا کننده یا مجموع قندهای کاهنده می‌توانند به راحتی توسط آنزیم‌ها احیا (کاهش) یابند و به مولکول‌های ساده‌تر تجزیه شوند.

تجزیه و تحلیل پسماند مواد غذایی برای تولید سوخت زیستی در راستای رشد پایدار تا سال ۲۰۳۰، که توسط سازمان ملل در سال ۲۰۱۵ تعیین شده است، در حال افزایش است (Prasoulas et al. 2020).

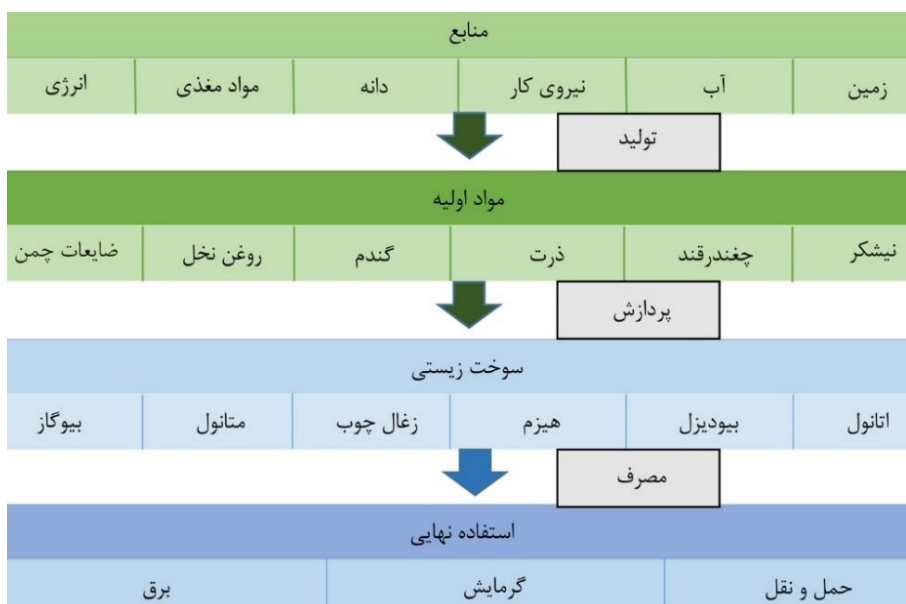
عبارت "سوخت‌های زیستی" به مواد شیمیایی با انرژی غنی اشاره دارد. این سوخت‌ها توسط فرآیندهای زیستی تولید می‌شوند؛ و از زیست توده جانداران زنده استخراج می‌شوند. سوخت‌های زیستی یکی از جایگزین‌های مهم هستند. این سوخت می‌تواند نیاز روزافزون جهان به منابع انرژی را تامین کند. برای سال‌های طولانی، سوخت‌های فسیلی منبع اصلی انرژی می‌باشند؛ اما استفاده از آنها سازگار با محیط زیست نبوده؛ و سوختن سوخت‌های فسیلی مشکلات زیست محیطی را ایجاد می‌کند (Allakhverdiev et al. 2009; Razzak et al. 2015; Voloshinet al. 2013).

برای تولید سوخت زیستی میکروبی، روش‌های جدیدتر به خوبی تحلیل و درک شده‌اند؛ و براساس نتایج بالقوه، فنون کشت ریزجلبک‌ها جهت تولید مستقیم انرژی برای ساخت سوخت زیستی پیشنهاد شده‌اند. به عنوان مثال، پردازش غشا زیستی ریزجلبک‌ها یا سیانوباکتری‌ها ممکن است، یک روش فنی جدید برای تجزیه زیست توده به منظور تولید سوخت‌های زیستی باشد (Demirbas 2009; Heimann 2016). در سال‌های اخیر، منبع پرترفدار سوخت‌های زیستی، زیست توده گیاهی است. قند، ماده مولکول ضروری برای تولید بیومتانول و بیواتانول است (Demirbas 2009; Heimann 2016).

منابعی مانند زمین، آب، نیروی کار، بذر، مواد مغذی، انرژی و ...، مواد اولیه از جمله نیشکر، چغندر قند، ذرت، گندم، روغن نخل، ضایعات چمن^۱ و ... را تولید می‌کنند (شکل ۱-۱). بعد از پردازش مواد اولیه، سوخت‌های زیستی مانند اتانول، بیودیزل، چوب سوختی، زغال چوب و بیوگاز به عنوان محصول نهایی تولید می‌شوند؛ و می‌توان از پسماند غذایی در حمل و نقل، پخت و پز و منابع انرژی دیگر استفاده کرد (The State of Food and Agriculture 2008).

سوخت‌های زیستی را می‌توان به دو نوع سوخت‌های زیستی اولیه و ثانویه تقسیم بندی کرد. جدول ۱-۲ تقسیم‌بندی سوخت‌های زیستی را به طور واضح نشان می‌دهد. سوخت‌های زیستی اولیه، سوخت‌هایی هستند که به طور طبیعی از چوب سوختی، حیوانات، گیاهان، پسماند

جنگلی و زباله‌های محصولات کشاورزی به دست می‌آیند. سوخت‌های زیستی ثانویه از منابعی مانند گیاهان و میکروارگانیسم‌ها به دست می‌آیند. سوخت‌های زیستی ثانویه را می‌توان به سه نسل مجزا طبقه بندی کرد. اتانول، که از مواد غذایی نشاسته‌دار مانند سیب‌زمینی، ذرت، گندم، جو و نیشکر تولید می‌شود؛ و بیودیزل که از سویا، آفتابگردان و چربی حیوانی تهیه می‌شود، نمونه‌هایی از سوخت‌های زیستی نسل اول هستند. بیواتانول و بیودیزل به عنوان سوخت‌های زیستی نسل دوم از چندین گونه مانند علف نقره‌ای^۱، کاه، گیاه دانه روغنی^۲، گیاه ریشه نشاسته‌ای^۳، چمن و چوب تولید می‌شوند. بیودیزل تولید شده توسط ریزجلبک‌ها و میکروب‌ها به عنوان سوخت زیستی نسل سوم در نظر گرفته می‌شود (Poudyal et al. 2009; Seibert 2015; Slade and Bauen 2013; Chisti 2007; Carlsson et al. 2007; Lindberg et al. 2010; Carere et al. 2012; Cha et al. 2013; Razeghifard 2013; Singh et al. 2011; Atsumi et al. 2009; Tran et al. 2010; Gronenberg et al. 2013; Hasunuma et al. 2013; Verbeke et al. 2013; Ilmen et al. 2011; Tai and (Stephanopoulos 2013; Buijs et al. 2013; Abdelaziz et al. 2013).



شکل ۱-۱. سوخت‌های زیستی - از مواد اولیه تا استفاده نهایی (منبع: وضعیت غذا و کشاورزی 2008)

جدول ۱-۲. طبقه بندی سوخت‌های زیستی

اولیه	ثانویه		
	نسل اول	نسل دوم	نسل سوم
هیزم، تراشه‌های چوب، پالت، فضولات حیوانی، ضایعات محصولات کشاورزی و جنگل، گازهای محل دفن زباله	بیواتانول یا بوتانول با تخمیر نشاسته (از گندم، جو، ذرت، سیب زمینی) یا قند (از نیشکر و چغندر قند). بیودیزل با انجام فرآیند ترانس استریفیکاسیون محصولات روغنی (گیاه کلزا، سویا، آفتابگردان، نخل خرما، نارگیل، روغن پخت و پز استفاده شده و چربی‌های حیوانی)	اتانول زیستی و بیودیزل از فناوری‌های رایج اما بر پایه نشاسته، روغن و محصولات قندی جدید مانند گیاه دانه روغنی، گیاه ریشه نشاسته ای و علف نقره ای تولید می‌شوند. بیواتانول، بیوبوتانول و سیندیزل از مواد لیگنوسلولزیک مانند کاه، چوب و علف تولید می‌شوند.	بیودیزل از ریز جلبک‌ها؛ بیواتانول از ریز جلبک‌ها و جلبک‌های دریایی؛ هیدروژن از ریز جلبک‌ها و میکروب‌های سبز تولید می‌شوند.

منبع: Dragone et al. (2010)

۱-۲ مقدمه

پسماند غذایی در بین مصرف‌کنندگان و سیاست‌گذاران در سراسر جهان به شدت مورد توجه قرار گرفته است. در گذشته، تولید انرژی از پسماند غذایی در مقابل دفع آنها در گذشته کمتر مورد استفاده قرار می‌گرفت. اما اکنون، با نگاهی به سلسله مراتب مدیریت پسماند (شکل ۱-۲)، می‌توان گفت که این فرض در حال تغییر است (Nordic Energy Research 2019). با این حال، گرمایش جهانی، تغییرات آب و هوا و محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، نیاز به یافتن راهکارهای جایگزین مناسب برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را ایجاد می‌کند.

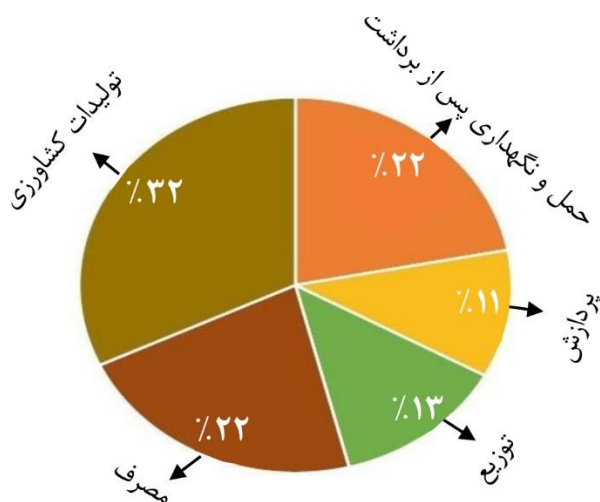
در کشورهای در حال توسعه، بخش حمل و نقل بخش اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای است. طبق اصول سیاست اقلیمی اتحادیه اروپا، زیست توده و بخش‌های غیرقابل استفاده از پسماند غذایی به عنوان یک راه حل برای تولید با انتشار کم گازهای گلخانه‌ای در بخش حمل و نقل در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین پسماند غذایی نقش مهمی در تولید سوخت حمل و نقل با انتشار کربن کم ایفا می‌کنند، با فرض اینکه سلسله مراتب مدیریت پسماند به شرح زیر می‌باشد (The state of food and agriculture 2019).



شکل ۱-۲. سلسله مراتب مدیریت پسماند و مواد غذایی

۳-۱ ویژگی‌های پسماند غذایی

- مشاهدات نشان می‌دهد که غذا عمدتاً در تمام مراحل زنجیره تامین مواد غذایی، از تولید تا مصرف، هدر می‌رود.
- اندازه گیری اقلام غذایی به صورت جداگانه مشکل بوده؛ و در تمام مسیر زنجیره غذایی هدر رفت مواد وجود دارد (شکل ۳-۱) (FAO, Food and Agriculture Organization 2014a). (of the United Nations 2014a)



شکل ۳-۱. اتلاف نسبی مواد غذایی در زنجیره تامین مواد غذایی

- پسماند مواد غذایی به هشت دسته از جمله؛ میوه‌ها، سبزیجات، غلات، شیر و تخم مرغ، محصولات روغنی، حبوبات و دانه‌های خوراکی، مرغ و گوشت، ماهی و غذاهای دریایی و سبزیجات تقسیم می‌شوند (جدول ۳-۱) (FAO, Food and Agriculture Organization (2014a) of the United Nations).

جدول ۳-۱. کل تولید کشاورزی و هدر رفت مواد غذایی در سطح جهانی

کالای کشاورزی	مثال	تولید (میلیون تن)	ضایعات کل (میلیون تن)	ضایعات خوراکی (میلیون تن)
میوه‌ها	موز، سیب، مرکبات، انگور، و ...	۵۵۰	۳۴۰	۳۰۰
سبزیجات	همه سبزیجات	۹۰۰	۳۶۰	۲۸۰
غلات	گندم، برنج یا پوست، دانه ارزن، جو، ذرت، گیاه چاودار، غلات دانه درشت، ذرت خوشه ای، و ...	۲۱۰۰	۴۰۰	۳۰۰
شیر و تخم مرغ	شیر و فرآورده‌های تخم مرغ	۷۳۰	۱۰۰	۱۰۰
محصولات روغنی، حبوبات و گیاه بنشن	روغن‌ها و حبوبات	۵۱۰	۴۰	۳۵
مرغ و گوشت	گوشت مرغ، بز، گاو، گوسفند، خوک وحشی	۳۵۰	۵۰	۵۰
ماهی و غذاهای دریایی	ماهی، خرچنگ، و ...	۱۲۰	۲۰	۰
ریشه‌ها	ریشه‌های نشاسته‌دار ^۱	۷۰۰	۳۰۰	۲۴۰
کل		۵۹۶۰	۱۶۱۰	۱۳۰۵

منبع: (Shuang and Yang (2016)

۱. ریشه‌های نشاسته‌دار گروهی از گیاهان هستند که در زیر زمین رشد می‌کنند. این ریشه‌ها حاوی مقدار زیادی نشاسته هستند که به عنوان منبع اصلی انرژی برای گیاهان و همچنین برای انسان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- اقلام غذایی فوق مسئول عمده تمامی پسماند غذایی در هر منطقه هستند. به طوری که تفاوت‌هایی بین مناطق وجود دارد؛ و این تفاوت‌ها به میزان درآمد افرادی که در این منطقه‌ها زندگی می‌کنند، بستگی دارد.
- تقریباً ۸۵ درصد از کل پسماند غذایی مربوط به محصولات کشاورزی مانند: میوه‌ها و سبزیجات است؛ و بخش دیگری از پسماند غذایی مربوط به فضولات دامی می‌باشد.
- در بخش‌هایی که مدیریت استفاده صحیح از مواد غذایی وجود ندارد، میزان پسماند گوشت بیشتر از نسبت به بخش‌هایی که مدیریت صحیح وجود دارد.
- اجزای اصلی پسماند غذایی شامل کربوهیدرات‌ها، چربیها و پروتئین‌ها هستند. علاوه بر تأمین اکثر عمده‌ی پسماند غذایی، این سه حوزه دیگر نیز در ایجاد پسماند غذایی نقش مهمی ایفا می‌کنند. به عبارت دیگر، هدر رفت آب و تولید فاضلاب، آلودگی خاک و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تجزیه پسماند، همگی به عنوان عواملی مشارکت دهنده در ایجاد پسماند غذایی محسوب می‌شوند (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations 2014b).
- فاضلاب می‌تواند به عنوان عامل غیررسمی در نظر گرفته شود؛ زیرا حاوی تعداد کمی ترکیبات مضر و غیرقابل تجزیه از صنایع فرآوری غذا می‌باشد (Unido. Pollution from food Processing Industries 2001).
- فاضلاب پنی‌ر سویا کربن کمی دارد؛ اما سرشار از نیتروژن است؛ و حاوی مقدار کمی پلی‌ساکارید بوده که این امر آماده‌سازی را قبل از تبدیل از طریق تخمیر ضروری می‌کند (Wang et al. 2006).
- فاضلاب حاصل از فرآوری سیب زمینی یک پیش نیاز خوب برای تولید الکل بوده؛ زیرا غنی از نشاسته است (Chandrasekharan 2012).

۴-۱ تولید سوخت‌های زیستی

۴-۱-۱ تولید بیودیزل از پسماند مواد غذایی

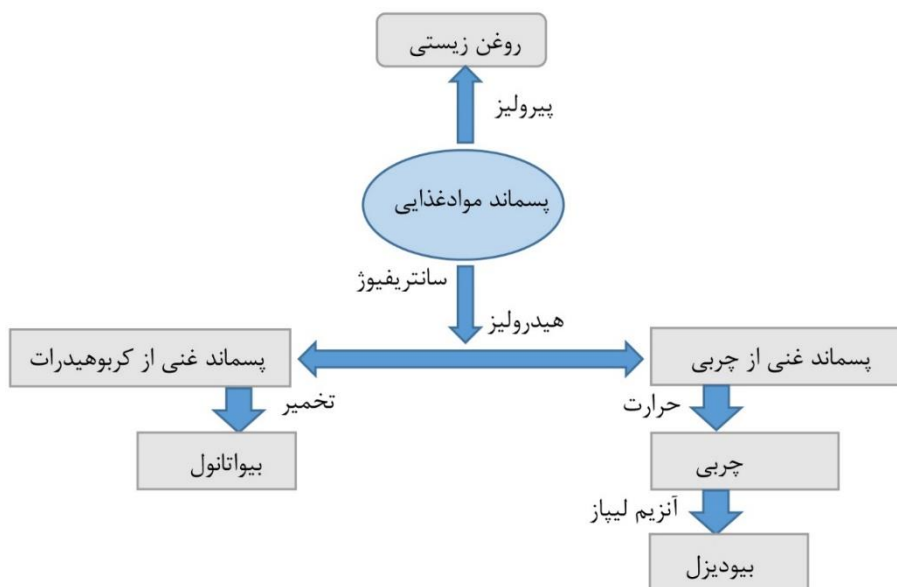
بیودیزل به عنوان سوخت در اروپا، ایالات متحده و بسیاری از کشورهای دیگر استفاده می‌شود. بیودیزل در سطح ترکیب و ساختار شیمیایی، از متیل استرهای اسید چرب تشکیل شده است. بیودیزل، بسته به منبع مواد اولیه آن مانند: روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی و روغن‌های

زائد، شامل متیل استرهای اسید چرب اشباع و غیراشباع می‌شود. روغن‌های آفتابگردان، نخل خرما^۱، سویا^۲، گیاه کلزا^۳ و سایر روغن‌های گیاهی خوراکی معمولاً برای تولید بیودیزل استفاده می‌شوند. بیودیزل ساخته شده از روغن‌های خوراکی گران می‌باشد؛ بنابراین هزینه فعلی بیودیزل بیشتر از سوخت‌های نفتی است. در نتیجه، برای تولید بیودیزل نیاز به روغن‌های با هزینه پایین و غیرقابل مصرف می‌باشد. گونه‌های گیاهی با روغن غیرقابل مصرف مانند گیاه دانه روغنی، راش هندی^۴، درخت روغن^۵ و سایر گیاهان در حال حاضر برای تولید بیودیزل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

برای تولید بیودیزل از پسماند غذایی، استخراج چربیها ضروری است. ابتدا پسماند غذایی با آب حل شده و یک مخلوط (معمولاً ۱۰۰ گرم پسماند غذایی در ۱ لیتر آب) تشکیل شده و با حلال‌های آلی غیرقطبی مانند: n-هگزان و دی‌اتیل اتر به شدت ترکیب می‌شود. این مرحله اختیاری است؛ اما می‌توان آن را انجام داد. پس از آن، مخلوط جمع آوری شده در قیف جداکننده ریخته می‌شود. لایه آلی جدا شده و تحت فشار کم تبخیر می‌شود تا چربی بدون حلال آلی به دست آید (Karmee 2016).

بیودیزل یک مونو آلکیل استر اسید چرب یا متیل استر اسید چرب است که یک سوخت سازگار با محیط زیست و پاک است؛ و جایگزینی برای گازوئیل و بنزین می‌باشد (Yaakob et al. 2014; Karmee and Lin 2013). بیودیزل تولید شده با استفاده از پسماند مواد غذایی و روغن‌های مصرف شده دارای انتشار کم، غیر سمی، زیست تخریب پذیر و بدون انتشار دی‌اکسید کربن به محیط زیست است (Wan Omar and Saidina Amin 2011; Yaakob et al. 2013). در حال حاضر، یکی از مناسب ترین سوخت‌های جایگزین است. اخیراً، تولید سوخت زیستی از چربی‌ها در اتحادیه اروپا و بریتانیا به طور قابل توجهی افزایش یافته است (Lin et al. 2013). فرآیند ترانس استریفیکاسیون مستقیم توسط کاتالیزورهای شیمیایی، آنزیم‌ها یا تخمیر ریز جلبک‌ها برخی از روش‌های تولید بیودیزل از پسماند مواد غذایی هستند. یک تصویر از روش‌های ممکن برای تهیه سوخت‌های زیستی مختلف از پسماند غذایی با استفاده از روش‌های مختلف در شکل ۱-۴ ارائه داده شده است.

-
1. Palm
 2. Soybean
 3. Rapeseed
 4. Pongamia
 5. Mahua



شکل ۴-۱. شکل طرحی از راه‌های ممکن برای تهیه سوخت‌های زیستی مختلف از زباله‌های مواد غذایی

فرآیند ترانس استریفیکاسیون چربی‌ها به بیودیزل، یک مرحله بسیار مهم است. علاوه بر این، روغن‌ها و چربی‌ها قابلیت رقیق شدن و مخلوط شدن با بنزین نفتی را دارند؛ تا به طور مستقیم در موتورها استفاده شوند. فرآیند ترانس استریفیکاسیون می‌تواند با استفاده از کاتالیزگر اسیدی، بازی یا آنزیمی انجام شود. از پسماند مواد غذایی (مانند استخوان، خاکستر و پوسته) می‌توان برای استخراج این کاتالیزورها استفاده کرد. آقای تان و همکاران (2015) از پوسته تخم مرغ خشک شده به عنوان یک کاتالیزگر ناهمگن استفاده کردند؛ و از روغن خوراکی پسماندی به عنوان ماده اولیه برای تولید بیودیزل استفاده کردند. برای تولید بیودیزل، بهینه‌سازی روش‌های پیش‌پردازش ضروری است؛ زیرا در صورت استفاده از مواد اولیه مختلف که ترکیبات متفاوتی دارند، نیاز به تنظیم و بهینه‌سازی فرآیندهای پیش‌پردازش وجود دارد (de Almeida et al. 2015). فرآیند ترانس استریفیکاسیون می‌تواند با استفاده از روش‌های فراصوت و مایکروویو به منظور افزایش بازده تولید محصول، بهبود یابد. در طول فرآیند ترانس استریفیکاسیون، دستگاه باید بدون آب باشد؛ تا از تشکیل شرایط قلیایی جلوگیری شود.

اخیراً، امکان بهره‌برداری از پسماند غذایی به عنوان ماده اولیه برای تولید بیودیزل توسط برخی از شرکت‌های نمونه مانند شرکت SENECA Green Catalyst SL در اسپانیا و شرکت Brocklesby Ltd در انگلستان نشان داده شده است (Lin et al. 2013).

سِنِکا گرین کاتالیست (SENECA Green Catalyst) یک شرکت در جنوب اسپانیا است. این شرکت با استفاده از فناوری‌های ترکیبی جدید، روزانه ۳ تا ۵ تن بیودیزل تولید می‌کند. این روش، امکان فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون و استریفیکاسیون همزمان روغن پسماندی را در یک مخزن فراهم می‌کند. برای تبدیل اسیدهای چرب آزاد به متیل استر اسید چرب در شرایط همگن، استفاده از پیش‌استریفیکاسیون با سدیم هیدروکسید و متانول صورت گرفت؛ سپس با استفاده از روش آنزیمی، ترانس‌استریفیکاسیون انجام شد. این شرکت، در انتهای فرآیند، یک جاذب برای تصفیه بیودیزل تولید کردند. محبوبیت این روش تحت تأثیر عواملی مانند: کیفیت و تنوع روغن پسماندی خوراکی، تقاضای صنعت و بازار، موقعیت جغرافیایی و رقابت‌پذیری هزینه‌های عملیاتی و سایر عوامل قرار می‌گیرد (Woodgate and Van der Veen 2004).

پسماند مواد غذایی در اثر فرآیند تخریب سلولی قرار می‌گیرند؛ پس از آن، با استفاده از فرآیندهای خردکردن و پردازش حرارتی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، روغن مایع از داخل سلول‌ها جدا می‌شود. پس از آن، بخش روغن/چربی از لجن مرطوب جدا می‌شود؛ و آب تحت جداسازی مکانیکی پایدار با استفاده از سانتریفیوژ تریکانتر^۱ مورد پردازش قرار می‌گیرد. در حال حاضر، این کارخانه سالانه ۲۰۰۰ تن زباله غنی از تری گلیسیرید از جمله فضولات دام را به بیودیزل با بازده ۳۰ درصد تبدیل می‌کند. انواع پیش‌نیازها و محصولات در فاز مرطوب و نیمه جامد را می‌توان با این روش مدیریت کرد. باقیمانده نشاسته‌ای و غنی از فیبر برای کمپوست به خارج از سیستم منتقل می‌شوند. محصولات جانبی غنی از کربوهیدرات می‌توانند به عنوان یک پیش‌نیاز برای تخمیر یا به عنوان یک ماده اولیه جایگزین برای پیرولیز مایکروویو استفاده شوند. بنابراین پیرولیز مایکروویو یک تصفیه مناسب برای استخراج روغن و همگن سازی از زباله‌های غذایی می‌باشد (Liu et al. 2014). پیرولیز مایکروویو، یک روش محبوب برای خشک کردن پسماند و تولید زغال زیستی با ارزش حرارتی بالا است. همچنین، این روش منجر به تولید روغن زیستی می‌شود. می‌توان انرژی را استخراج کرد؛ و حجم پسماند غذایی جامد را کاهش داد.

فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون روغن‌های میکروبی از میکروارگانیسم‌های روغنی مختلف می‌تواند برای تولید بیودیزل از پسماند غذایی استفاده شود (Chen et al. 2009; Mahmood and Hussain 2010; Papanikolaou et al. 2011; Pleissner et al. 2013; Yaakob et al. 2013). پسماند غذایی به عنوان ماده غذایی برای رشد میکروارگانیسم‌های

۱. دستگاه سانتریفیوژ تریکانتر قادر است محلول‌ها را به سه بخش مجزا از یکدیگر معمولاً به صورت جامد، مایع و مایع جدا کند.

غنی از روغن استفاده می‌شود؛ تا روغن را جذب کنند. سپس این روغن از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون تغییر می‌کند. روغن‌های میکروبی می‌توانند توسط گونه‌های مختلف مخمر یا ریزجلبک‌ها تولید شوند؛ و به عنوان جایگزینی برای روغن‌های گیاهی مورد استفاده قرار بگیرند، زیرا ترکیب اسیدهای چرب مشابهی با آنها دارند.

۱-۴-۲ تولید بیواتانول از پسماند غذایی

اتانول به عنوان یک سوخت مناسب برای موتورهای احتراق داخلی جدید در ماشین‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. اتانول دارای عدد اکتان ۹۸ بوده و از عدد اکتان بنزین (۸۰) بالاتر است؛ و به دلیل فشار بخار پایین‌تر، دارای اتلاف تبخیر کمتری نسبت به بنزین است. اتانول در هوا نسبت به بنزین کمتر قابل اشتعال است؛ که این امر آن را به عنوان یک جایگزین ایمن تبدیل می‌کند. بیواتانول از طریق تخمیر قندهای ساده در زیست توده با استفاده از میکروارگانیسم‌هایی که هضم آنزیم را انجام می‌دهند، تولید می‌شود (Awasthi et al. 2015).

اتانول می‌تواند به جای بنزین به عنوان سوخت در حمل و نقل استفاده شود. واکنش‌های ترموشیمیایی برای پردازش مواد اولیه صنایع شیمیایی و سلول‌های سوختی استفاده می‌شود. بیواتانول از محصولات نشاسته‌ای مانند ذرت، سیب زمینی، برنج، نیشکر و بسیاری دیگر تولید می‌شود. استفاده از اتانول به عنوان جایگزین بنزین محدود شده است؛ زیرا مواد اولیه استفاده شده برای تولید اتانول در ایالات متحده (ذرت) و برزیل (نیشکر) برای مصرف در صنایع غذایی نیز استفاده می‌شوند. با افزایش تولید اتانول سوختی، هزینه ذرت در دهه‌های گذشته افزایش یافته است. در حال حاضر، بیواتانول تولید شده از مواد اولیه کم هزینه محبوبیت بیشتری پیدا کرده است.

زیست توده لیگنوسلولزی یک منبع انرژی جایگزین امیدوارکننده است. از این زیست توده می‌توان برای تولید اتانول استفاده شود. مراحل فرآیندهای تبدیل شامل: هیدرولیز سلولز در زیست توده لیگنوسلولز برای تولید کاهش قندها و تخمیر قندها به اتانول است (Awasthi et al. 2015). تبخیر به عنوان یک روش جداسازی روی پسماند مواد غذایی، باعث افزایش بازدهی و کارایی تولید بیواتانول می‌باشد (Shakharkar 2018).

۱-۴-۳ آماده سازی پسماند غذایی

استفاده از پسماند مواد غذایی برای تولید بیودیزل با چالش‌هایی مواجه است. این چالش‌ها

شامل ماهیت فساد پذیر پسماند مواد غذایی و دشواری تفکیک آنها از سایر پسماندها است. ذخیره سازی و کنترل پسماند غذایی با ترکیبات غنی از مواد مغذی به دلیل حساسیت آنها نسبت به آلودگی میکروبی، مشکل است. علاوه بر این، حجم بالایی از پسماند غذایی، دارای رطوبت بالایی می باشد. خشک کردن پسماند غذایی می تواند ماندگاری ذخیره سازی آنها را افزایش و همچنین فضای ذخیره سازی را کاهش دهد. به دلیل آسانی تجزیه و تفکیک پسماند غذایی با استفاده از میکروارگانیسم ها در حالت مرطوب، استفاده از پسماند غذایی برای تولید سوخت های زیستی بدون نیاز به خشک کردن، ترجیح داده می شود (Kim et al. 2005). پسماند غذایی حاوی کربوهیدرات های پیچیده مانند سلولز و همی سلولز است. هیدرولیز این کربوهیدرات ها دشوار می باشد.

مقدار ساکارز موجود در کربوهیدرات تأثیری بر کارایی تبدیل پسماند غذایی به اتانول دارد (Tubb 1986). گلوکز، فروکتوز، زایلوز، مالتوز، آمیلاز، ساکارز و آرابینوز از جمله قندهای قابل تخمیر هستند. این قندها، در فرآیند ساکارزی کردن برای تولید اتانول مورد استفاده قرار می گیرند. در صنایع تجاری، به طور ویژه از پروتئین یا ترکیبی از آنزیم ها مانند آلفا و بتا آمیلاز و گلوکو آمیلاز استفاده می شود. این آنزیم ها از منابع مختلفی مانند گیاهان، دانه ها یا میکروارگانیسم ها به دست می آیند. استفاده از این روش ها در تبدیل مواد مغذی موجود در پسماند به قند با موفقیت بیشتری صورت می گیرد. در تجزیه غلات، نشاسته به گلوکز تبدیل می شود. آنزیم سلولاز و زایلاناز به ترتیب سلولز و همی سلولز را تجزیه می کنند. همچنین، آنزیم پولولاناز تجزیه پیوند کووالانسی آلفا-۱،۶-گلیکوزیدی را افزایش می دهد. در نتیجه باعث از بین رفتن زنجیره های ساکاریدی خطی می شود. پس از مرحله فرآیند ساکارزی کردن، پسماند غنی از مواد مغذی تولید می شود. این پسماند شامل یک محلول لزج با غلظت بالای گلوکز است. این محلول لزج باعث فعال شدن مخمر می شود. محققان از آنزیم های هیدرولیز کننده نشاسته دانه ای در ساکارزی کردن و تخمیر همزمان در دمای پایین تر از ۴۸ درجه سانتی گراد استفاده کردند؛ تا این مشکل را حل کنند. از طریق سیستم بازگردش مواد مغذی پسماند، مقدار قابل توجهی اتانول (۳۰ درصد وزنی به وزنی) از پسماند غنی از مواد مغذی تولید می شود. پروتئین تجزیه کننده ذرات نشاسته باعث کاهش غلظت تخمیر محلول شده؛ و سطح قند را افزایش می دهد. علاوه بر این، مخمر را از بین می برد. علاوه بر این، با استفاده از سیستم بازگردش مواد مغذی پسماند، تولید اتانول افزایش می یابد. در این روش، با حذف یا تغییر ویژگی های مواد باقیمانده، تحت شرایط خاص، اتانول تولید می شود.

به علت ساکارزی کردن، قندهای مختلفی مانند گلوکز، فروکتوز و زایلوز تولید می شوند. با این

حال، گونه‌های مخمر ساکارومایسس که به طور سنتی در تخمیر اتانول استفاده می‌شوند، نمی‌توانند زایلوز را به اتانول تبدیل کنند.

۱-۴-۲ روش‌های فرآیند

در ابتدا، در طی فرآیند نگهداری، پسماند غذایی به باکتری‌های اسید لاکتیک شده تا به مدت ۴۸ ساعت اسید لاکتیک تولید کنند. سپس، با افزودن گلوکوامیلاز، پسماند غذایی به قندها تجزیه شدند؛ و مایع حاصل شامل گلوکز و اسید لاکتیک است. ۷۰ درصد از اسید لاکتیک می‌تواند به اسید پیروویک، که به عنوان محلول نهایی در تولید اتانول استفاده می‌شود، تبدیل شود. این تبدیل می‌تواند با غیرفعال کردن آنزیم لاکتات اکسیداز به مدت ۵ ساعت انجام شود. با افزودن آنزیم، بازده تولید اتانول ۲۰ درصد بیشتر از حالت بدون افزودن آنزیم بهبود می‌یابد. برای دستیابی به بازده بالاتر در تولید اتانول، از یک طرح فاکتوریل ۲۳ (در این طرح، سه عامل مختلف با دو سطح مختلف آزمایش شدند تا تأثیر آنها بر بازده تخمیر مورد بررسی قرار گیرد) برای بهینه‌سازی شرایط تخمیر استفاده می‌شود.

۱-۴-۳ تولید هیدروژن و متان از پسماند مواد غذایی

۱-۴-۳-۱ تولید هیدروژن

هیدروژن به عنوان گاز طبیعی فشرده استفاده می‌شود؛ و به دلیل ویژگی‌های کارایی انرژی بالا (۱۴۲/۳۵ کیلوژول بر گرم) و غیرسمی، یکی از بهترین منابع سوختی آینده است. تولید هیدروژن زیستی تجدیدپذیر با استفاده از روش فنی‌های نوظهور مانند: تجزیه فوتوالکتریکی آب، تجزیه حرارتی خورشیدی آب، بازسازی منابع تجدیدپذیر و تخمیر مواد قندی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پسماند غذایی غنی از کربوهیدرات و کم هزینه می‌تواند گزینه مناسبی برای تولید هیدروژن باشد. برای تبدیل پسماند غنی از مواد مغذی به سوخت‌های زیستی، نیاز به پیش‌بینی و آماده‌سازی پسماند است. روش‌های آماده‌سازی می‌تواند کارایی فرآیندهای تخمیر را افزایش دهند. کربن و نیتروژن نیز در منابع پسماند غنی از مواد مغذی، مانند لیگنوسلولز، نشاسته و پروتئین، وجود دارند. کربن و نیتروژن باید حذف یا به مولکول‌های ساده‌تر تبدیل شوند.

۱-۴-۳-۲ تولید متان

در اصل، متان به عنوان بیوگاز شناخته می‌شود؛ و یک منبع تجدیدپذیر انرژی است. این منبع انرژی از زمان‌های قدیم توسط انسان‌ها استفاده می‌شود. متان نیز یکی از گازهای عمده

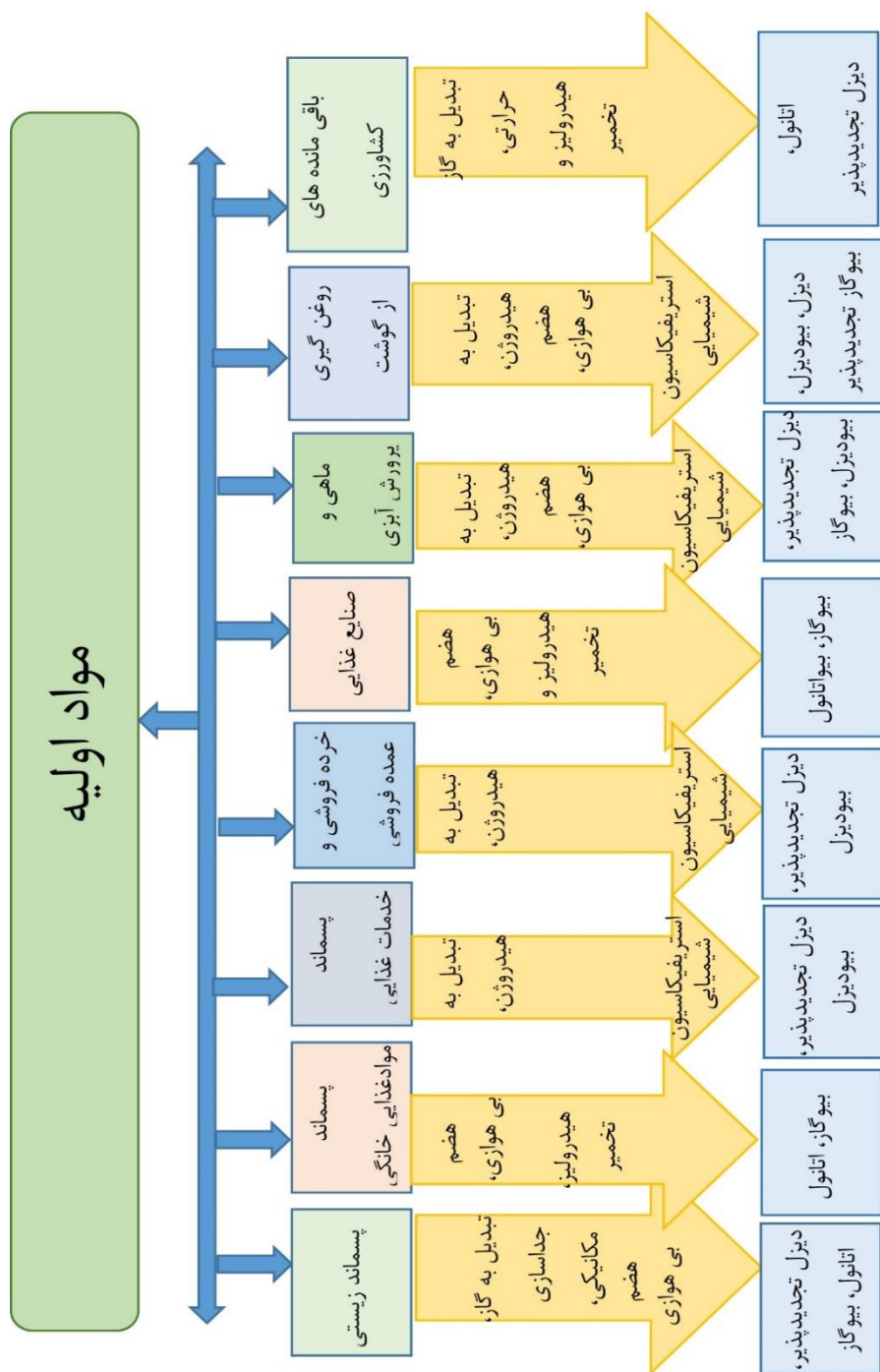
منتشر شده از مزارع کشاورزی است. این گاز، از تجزیه زباله در محل‌های دفن زباله به دست می‌آید. به دلیل عدم کنترل دقیق این واکنش، مواد غذایی موجود در زیر خاک به متان تبدیل می‌شوند. تولید متان با افزایش ارزش غذایی محصولات مزرعه افزایش می‌یابد. علاوه بر این، پسماند غنی از مواد مغذی می‌توانند به عنوان کود و اصلاح کننده خاک استفاده شوند. در فرآیند ترکیبی، از یک فرآیند مشترک برای تولید همزمان متان و هیدروژن استفاده می‌شود. تقریباً هر ماده خام گیاهی، شامل پسماند غذایی، کاغذ باطله و مقوا، چمن بریده شده، پسماندهای مختلف، پساب‌های صنعتی، فاضلاب و فضولات دام، می‌تواند برای تجزیه بی‌هوازی و تولید متان استفاده شود. استفاده بیشتر از پسماند غذایی برای تولید متان ممکن است به دلیل حاوی مواد تغذیه‌ای قابل فساد مانند متانوزن‌ها، انجام شود. مسیرهای فناوری کلی برای تولید سوخت‌های حمل و نقل از پسماند غذایی در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.

برای تصفیه بیوگازها، فرآیندهایی مانند استخراج بخار آب، حذف دی اکسید کربن، جذب فیزیکی دی اکسید کربن، جذب شیمیایی دی اکسید کربن، جداسازی با استفاده از سرمایش و پردازش با استفاده از غشا، از جمله روش‌های تصفیه استفاده شده است (Malode et al. 2021).

۱-۵ اقتصاد سوخت زیستی از زباله‌های مواد غذایی

قاره‌هایی مانند آسیا و اروپا در سیاست‌های مالی خود، تمرکز بیشتری بر استفاده از انرژی سوخت زیستی دارند. در جدول ۱-۴، استفاده از پسماند غذایی به شکل‌های مختلف در سراسر جهان نشان داده شده است (Nordic Energy Research 2019). در بین صاحبانظران و دانشمندان در بسیاری از استان‌های کشور آمریکا، تقاضای استفاده از این نوع سوخت زیستی در حال افزایش است. در دهه‌های آینده، بسیاری از کشورها به همین روش سعی خواهند کرد؛ تا سوخت‌های زیستی را توسعه دهند. سوخت‌های زیستی می‌تواند یک اقتصاد پرسود باشد. این سوخت‌ها، نیروی محرک اصلی برای توسعه اقتصادی می‌باشند. تولید سوخت زیستی از پسماند غذایی مزیت مالی بیشتری دارد. براساس تحقیقات علمی و تحلیل‌های اقتصادی، سوخت‌های زیستی قادرند، میزان گازهای گلخانه‌ای را نسبت به سوخت‌های فسیلی کاهش دهند (Hertel et al. 2010; Huang et al. 2013).

تولید سوخت زیستی، علاوه بر اینکه می‌تواند وابستگی به سوخت نفتی را کاهش دهد؛ هزینه تولید بیودیزل، بیواتانول، متان و هیدروژن را نیز کاهش می‌دهد. همچنین، تولید سوخت زیستی باعث می‌شود که کشورها برای انرژی به دیگران وابسته نباشند. تولید سوخت زیستی تاثیر مثبتی بر اقتصاد دارد.



شکل ۱-۵. مسیرهای فناوری برای تولید سوخت حمل و نقل از زباله های مواد غذایی

جدول ۱-۴. تخمین استفاده از پسماند مواد غذایی در سراسر جهان

درصد	شکل استفاده شده
۲۱	غذا و خوراک
۰۲	مواد شیمیایی
۰۰	مصرف خودکار ^۱
۱۲	کمپوست
۲۲	بیوگاز
۰۱	سوخت زیستی
۰۰	محل دفن زباله
۳۰	سوزاندن
۱۱	ثبت نشده ^۲

دو سوخت زیستی مایع (بیودیزل و بیواتانول) برای جایگزینی گازوئیل و بنزین استفاده می‌شود. استفاده از زباله‌های غذایی در تولید سوخت‌های حمل و نقل مانند بیودیزل و بیواتانول مفید می‌باشد. استفاده از پسماند مواد غذایی در تولید سوخت‌های زیستی، می‌تواند هزینه مواد اولیه و هزینه سوخت‌های زیستی تولید شده از آنها را کاهش دهد. بطور کلی، پسماند غذایی بدون هیچ هزینه‌ای دورریخته می‌شوند؛ و به عنوان منابع رایگان و در دسترس شناخته می‌شوند. پس از جمع‌آوری پسماند غذایی از مبدا تولید، هزینه‌های اصلی شامل جداسازی، حمل و پیش‌پردازش می‌باشند.

یک مطالعه ترکیبی در جنبه‌های فنی و اقتصادی، اطلاعاتی را درباره طرح و برآورد هزینه برای کارخانه‌های تولید سوخت زیستی ارائه خواهد داد. برای نظارت بر پیشرفت روش، اطلاعات واقعی تبلیغ شده، و تجزیه و تحلیل مالی درباره تسهیلات تولید و هزینه سوخت زیستی‌ها، نیاز است (Karmee 2016). هزینه سوخت زیستی تولید شده از پسماند غذایی بالاتر از منابع انرژی نفتی رایج است. این امر می‌تواند یک مانع مالی برای تولید سوخت

۱. مصرف خودکار به استفاده از سیستم‌ها، دستگاه‌ها یا فرآیندهایی اشاره دارد که بدون نیاز به دخالت یا کنترل مستقیم انسان، به صورت خودکار عمل می‌کنند. به عنوان مثال، خودروهای خودران که بدون نیاز به راننده عمل می‌کنند، یک نمونه از استفاده خودکار در صنعت خودرو هستند.

۲. اطلاعاتی است که هنوز به درستی یا به صورت کامل جمع‌آوری و ثبت نشده است.

زیستی از پسماند غذایی باشد. تقاضای سوخت زیستی می‌تواند منجر به افزایش قیمت غذا شود. این امر ممکن است تقاضای مردم برای غذا را تحت تأثیر قرار دهد؛ همچنین باعث افزایش میزان کمبود غذای سالم و محصولات غذایی در کشورهای در حال توسعه شود (Skarlis et al. 2012).

۱-۶ کاربردهای پسماند غذایی از صنایع مختلف

استفاده از زباله‌های غذایی به عنوان زیست توده می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی عمل کند؛ و هزینه‌های دفع پسماند غذایی را کاهش دهد.

(الف) از پوست موز سبز و پوست آناناس

در مطالعه انجام شده توسط ویلیامز و همکاران (2013)، اعلام شد که پوست موز، اجزای گیاهی و پوست آناناس قابل استفاده برای تولید بیواتانول هستند. این فرآیند شامل فرآیند ساکارازی کردن و تخمیر به مدت ۷ روز در حضور باکتری *آسپرژیلوس نیچر*^۱ و مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* انجام می‌شود. بازده زیست توده، وزن سلولی خشک، کاهش غلظت قند و بازده اتانول در فاصله ۲۴ ساعت تخمین زده شد. نتایج نشان داد که پس از فرآیند تخمیری که به مدت ۷ روز انجام شد، بازده زیست توده برای پوست آناناس با جذب نوری ۱/۸۹ و پس از آن پوست موز با جذب نور ۱/۶۰ بالاترین عملکرد را دارد؛ اما موز سبز با جذب نور ۰/۹۸ کمترین عملکرد را دارد. بازده اتانول برای پوست آناناس ۸/۳۴ درصد حجمی به حجمی، برای پوست موز ۷/۴۵ درصد و برای موز سبز ۳/۹۸ درصد حجمی به حجمی بود. این نتایج نشان می‌دهد که بازده اتانول در پوست آناناس و پوست موز ($p < 0.5$) نسبت به موز سبز بیشتر است. در بیشتر پسماندهای میوه، قند قابل تخمیر وجود دارد که به راحتی قابل تبدیل به سوخت مفیدی مانند بیواتانول است (Reddy et al. 2011; Reena 2016).

(ب) از انبه:

صنایع فرآوری میوه انبه، باقیمانده‌های جامد (پوست و هسته) و باقیمانده‌های مایع (آمیوه و آب مورد استفاده برای شستشوی میوه) را تولید می‌کنند. استفاده از این مواد باقی مانده‌ها هم به عنوان یک ضرورت و هم به عنوان یک چالش مطرح است. بعد از تخمیر، پوست انبه شامل مقدار قابل توجهی ۴۰ درصد (وزنی به حجمی) قندهای کاهنده است؛ و منجر به تولید ۵/۱۳

1. *Aspergillus niger*

درصد (وزنی به حجمی) اتانول می‌شود. با استفاده از مواد مغذی مانند مخمر، سبوس گندم و پروتئین پیتون^۱، تولید اتانول تا ۷/۱۴ درصد (وزنی به حجمی) افزایش یافت. مخمر ساکارومایسس سرویزیه و باکتری اختیاری *زیموموناس موبیلیس*^۲ را می‌توان برای تولید الکل صنعتی استفاده کرد. از بین این دو، باکتری *زیموموناس موبیلیس* نسبت به مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* بازده، کارایی و قابلیت سازگاری بیشتری دارد (Ylittervo 2008; Reena 2016).

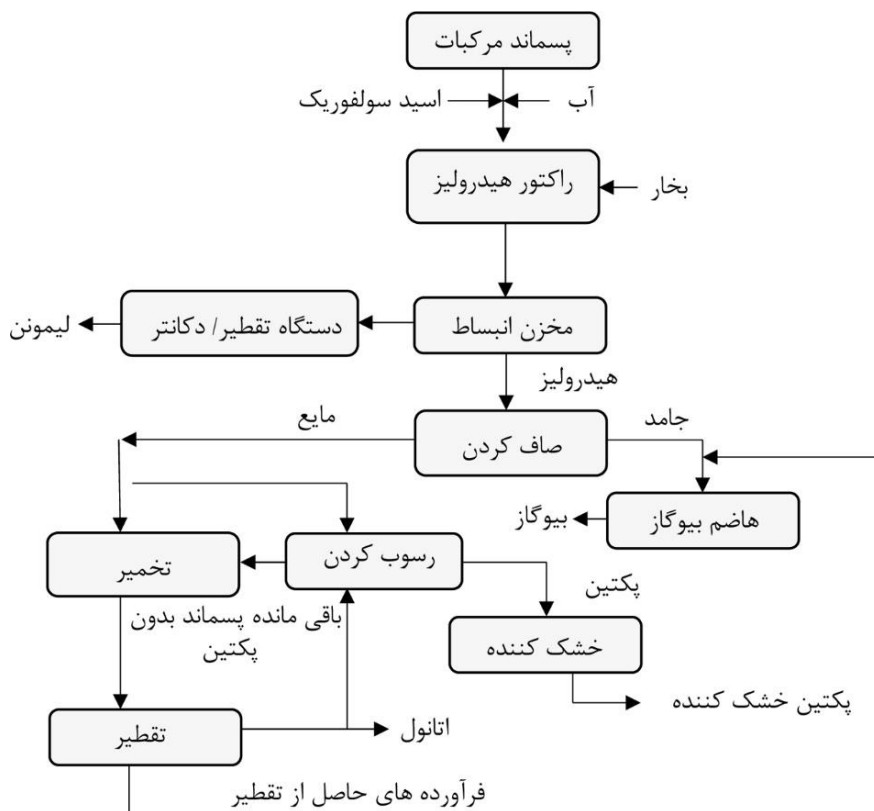
(ج) از پوست پرتقال:

پوست پرتقال به مقدار زیادی در صنایع و منازل دور ریخته می‌شود. در هر صنایع فرآوری آب پرتقال، نیمی از میوه‌های پرتقال به عنوان تفاله پس از استخراج آب پرتقال به عنوان پسماند دور ریخته می‌شوند. پسماند پوست مرکبات شامل ترکیبی از پوست‌ها، پوسته‌های بیرونی و دانه‌ها هستند. این پسماند حاوی پکتین (نوعی پلی ساکارید)، سلولز و قندهای محلول می‌باشند. با استفاده از فرآیند تخمیر در دماهای ۲۵-۳۵ درجه سانتیگراد، می‌توان اتانول تولید کرد؛ و برای افزایش تولید اتانول، می‌توان از مخمر استفاده کرد.

پوربافرانی و همکاران (2010) تولید اتانول، بیوگاز، پکتین و لیمونن (مایع بی‌رنگ هیدروکربنی) از پسماند پوست پرتقال را با استفاده از یک روش جامع بررسی کرد. بهترین عملکرد قند (۰/۴۱ گرم برای هر گرم از کل پسماند خشک) با هیدرولیز اسید رقیق در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد در زمان ماند ۶ دقیقه به دست آمد. در این شرایط، انحلال پذیری بالایی از پکتین انجام شد؛ و با استفاده از روش استخراج حلال، ۷۷/۶ درصد از مقدار کل پکتین موجود در پسماند مرکبات استخراج شد. قندهای موجود در هیدرولیزها با استفاده از مخمر به اتانول تبدیل شدند. در نتیجه، بازده اتانول به میزان ۰/۴۳ گرم اتانول بر هر گرم قندهای قابل تخمیر به دست آمد.

سپس، با استفاده از فرآیند تخمیر بی‌هوازی، مواد مایع و جامد باقیمانده حاصل از پسماند مرکبات به منظور به دست آوردن بیوگاز تجزیه شدند. به طور کلی، ۱ تن پسماند مرکبات با وزن خشک ۲۰ درصد منجر به تولید ۳۹/۶۴ لیتر اتانول، ۴۵ متر مکعب متان، ۸/۹ لیتر لیمونن و ۳۸/۸ کیلوگرم پکتین می‌شود.

1. Peptone
2. *Zymomonas mobilis*



شکل ۱-۶. نمودار جریان برای تولید اتانول، بیوگاز، پکتین و لیمونن از پسماند مرکبات

د) از پوست لیمو:

در مطالعه بولودا-آگویلار و لویز گومز (2013) از فرآیندهای پیش تصفیه بخار تحت فشار و تجزیه آنزیمی بر روی پسماند پوست لیمو برای به دست آوردن بیواتانول، اسید گلوکرونیک، دی-لیمونن (ماده اصلی تشکیل دهنده رایحه مرکبات) و پکتین‌های مرکباتی استفاده کردند. این مطالعه در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. پردازش مقدماتی بخار تحت فشار و استخراج روغن‌های ضروری مرکبات لیمو در مقیاس آزمایشی مقدماتی انجام شد. اثر بخار تحت فشار بر ترکیب لیگنوسلولزی پسماند پوست لیمو با استفاده از روش آنالیز گرماسنجی حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت. فعالیت ضد میکروبی روغن لیمو بر روی مخمر *Saccharomyces cerevisiae* و تأثیر آن بر تولید اتانول در طی تخمیر نیز مورد مطالعه قرار گرفت. پسماند پوست لیمو با بخار تحت فشار از طریق تجزیه و تخمیر متوالی و همزمان پردازش شدند. غلظت قندها، اسید گلوکرونیک و اتانول برای اندازه گیری کارایی این فرآیندها تجزیه و تحلیل شد. فعالیت ضد

میکروبی قابل توجه روغن لیمو در غلظت‌های بالای ۰/۰۲۵ درصد بر روی مخمر ساکارومایسس سرویزیه مشاهده شده است. تصفیه مقدماتی بخار تحت فشار تأثیر مفیدی بر فرآیند پردازش پسماند پوست لیمو برای به دست آوردن اتانول و اسید گالاکتورونیک داشته است. این آماده سازی مقادیر باقیمانده روغن‌های اساسی را به کمتر از ۰/۰۲۵ درصد کاهش می‌دهد؛ و به طور قابل توجهی نیاز به آنزیم هیدرولیتیک را کاهش می‌دهد. می‌توان تولید اتانول بیش از ۶۰ لیتر بر هر ۱۰۰۰ کیلوگرم از زیست توده تازه پوست لیمو را به دست آورد.

ح) از تفاله سیب

مولینوو-سالسس و همکاران (2020) استفاده از تفاله سیب را به عنوان پیش نیاز برای تولید سوخت زیستی ارزیابی کردند. در ابتدا، فرآیند تولید بیواتانول انجام شد. سپس، باقیمانده‌های حاصل از این فرآیند تخمیر، همراه با باقیمانده‌های تخمیر بیوبوتانول که در دسترس بودند، برای تولید بیوگاز مورد بررسی قرار گرفتند. دوازده سویه باکتریایی و مخمر مختلف برای تولید بیواتانول مقایسه شدند. با استفاده از سویه‌های مختلف مانند قارچ کلویورومیسیس مارکسیانوس^۱، قارچ کلویورومیسیس لاکتیس^۲، مخمر ترموتولران‌های لایچانسیا^۳ و مخمر ساکارومایسس سرویزیه غلظت‌های بیواتانول حدود ۵۰ گرم در لیتر به دست آمد. این غلظت بیواتانول بازدهی‌های بین ۰/۳۷۱ تا ۰/۴۴۴ گرم بیواتانول بر گرم پیش نیاز را داشت. در فرآیند تولید بیواتانول و بیوبوتانول، پسماندهای تخمیر که از این فرآیندها به دست می‌آیند، می‌توانند متان تولید کنند. بازدهی خالص متان از پسماندهای تخمیر برای تولید بیواتانول و بیوبوتانول به ترتیب برابر با ۴۶۳ و ۲۹۰ میلی‌لیتر متان بر گرم جامدات قابل تبخیر (جامداتی که در فرآیند توانایی تجزیه و تبدیل به مواد دیگر را دارند) اضافه شده است. بازدهی متان در فرآیند ترکیب تفاله سیب و کود حیوانی برابر با ۵۹۶ میلی‌لیتر متان بر گرم جامدات قابل تبخیر اضافه شده بود. درصد تفاله سیب در این فرآیند ۱۴/۶ درصد و غلظت جامدات قابل تبخیر در پیش نیاز برابر با ۹/۳۸ گرم در هر لیتر بود.

۷-۱ مزایای سوخت‌های زیستی از پسماند مواد غذایی

چربی‌های پسماندها و روغن‌های مصرف شده در آشپزخانه، به جای دفن در محل پسماند یا ریختن در سینک ظرفشویی که ممکن است منجر به انسداد شود، به سوخت بیودیزل قابل

1. *Kluyveromyces marxianus*

2. *K. lactis*

3. *Lachancea thermotolerans*

تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست تبدیل می‌شوند. سوخت زیستی باعث کاهش قابل توجه انتشار دی‌اکسید کربن و گازهای گلخانه‌ای می‌شود. این نوع سوخت نسبت به سوخت‌های فسیلی، آلودگی محیطی را کاهش داده؛ و علاوه بر این، حجم مورد نیاز برای دفن پسماند را کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از سوخت زیستی هزینه‌های نگهداری و تصفیه فاضلاب یا آب را نیز کاهش می‌دهد. سوخت‌های زیستی منابع تجدیدپذیر انرژی هستند. این منابع شامل پسماند محصولات کشاورزی، پسماند گیاهان خوراکی، فضولات دام، پسماند نیشکر، چمن و سایر منابع زیستی هستند. استفاده از این منابع در تولید سوخت‌های زیستی در بسیاری از کشورها رایج است. دلایل استفاده از این منابع شامل حفظ جنگل‌ها، تأمین نیازهای انرژی مردم و در دسترس بودن منابع زیستی می‌باشد. سوخت‌های زیستی هنگام سوختن آلودگی کمتری منتشر می‌کنند؛ بنابراین آنها به عنوان بهترین جایگزین برای سوخت‌های فسیلی در نظر گرفته می‌شوند.

سوخت‌های زیستی که از پیش نیازهای پسماند تولید می‌شوند، ارزانتر از سوخت‌های سنتی دیگر مانند بنزین، پترول، گازوئیل و نفت سفید هستند. بیواتانول و بیودیزل می‌توانند به وسیله فرایند تجزیه‌ی زیست توده لیگنوسلولزی و پسماند روغن گیاهی با عملکرد تجزیه جلبک‌ها تولید شوند. سوخت‌های زیستی، به دلیل تولید شدن از منابع تجدیدپذیر، به عنوان یک منبع نامحدود از سوخت‌های سبز و ایمن، در صنایع و بخش حمل‌ونقل قابل استفاده هستند. باکتری‌ها، پسماندهای آلی (پسماندهای انسانی، حیوانی و غذایی) را تجزیه کرده و بیوگاز تولید می‌کنند. بیوگاز عمدتاً از گازهای گلخانه‌ای مانند متان و دی‌اکسید کربن تشکیل شده است. وقتی بیوگاز به عنوان سوخت برای پخت و پز، گرمایش و حمل و نقل استفاده می‌شود، مانع پراکندگی سوخت در هوا گرفته می‌شود؛ و به کاهش گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوا کمک می‌کند.

۸-۱ معایب سوخت‌های زیستی ناشی از پسماند مواد غذایی

سوخت‌های زیستی به عنوان سوخت‌های سبز و ایمن شناخته می‌شوند؛ زیرا می‌توانند به کاهش سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای که توسط خودروها تولید می‌شود، کمک کنند. اما استفاده از فناوری سوخت‌زیستی، به ویژه زمانی که برای تولید آن از محصولات غذایی استفاده می‌شود، با برخی معایب همراه است. در حال حاضر، ذرت به طور گسترده‌ای برای تولید بیواتانول استفاده می‌شود. افزایش تقاضای اتانول ممکن است قیمت ذرت را افزایش دهد.

استفاده از زمین‌های زراعی برای کشت مواد اولیه سوخت‌های زیستی می‌تواند باعث افزایش هزینه‌های مواد غذایی و در نهایت منجر به کمبود غذا شود.

سوخت‌های زیستی نسبت به سوخت‌های معدنی (بنزین و گازوئیل) عملکرد انرژی کمتری دارند. این امر منجر به مصرف بیشتر سوخت در خودروهایی می‌شود که با سوخت‌های زیستی کار می‌کنند. راه‌اندازی واحدهای تولید سوخت‌های زیستی از منابع زیستی مختلف نیز یک سرمایه‌گذاری گران قیمت است. اما واحدهای عملیاتی قادر به تولید بیوگاز در چند روز هستند. با تأمین منظم پسماندهای غذایی، می‌توان به طور مداوم مقادیر زیادی از بیوگاز که برای پخت و پز قابل استفاده است، تولید کرد.

۹-۱ چالش‌ها

پسماندهای غذایی منبعی با هزینه پایین هستند که می‌توان آن‌ها را به سوخت زیستی مایع تبدیل کرد. با این حال، برخی چالش‌ها وجود دارد. این چالش‌ها باید بررسی شوند؛ زیرا این حوزه یک زمینه پژوهشی نوظهور است. درک جامع و بحث درباره جوانب مختلف پسماندهای غذایی به عبور از محدودیت‌ها کمک می‌کند.

۱-۹-۱ صنعت سازمان نیافته

جمع‌آوری پسماند مواد غذایی به دلیل ماهیت سازماندهی نشده صنعت همچنان یک نگرانی است. دیدگاه عمومی نسبت به پسماندهای غذایی این است که باید آن‌ها را دور انداخت. این نگرش باعث می‌شود جمع‌آوری آن‌ها دشوار شود. برای تأکید بر اهمیت پسماندهای غذایی، نیاز به حمایت اجتماعی وجود دارد. صنایع غذایی، همچنین سازمان‌های برنامه‌ریزی شهری و مسکن باید یک طرح مناسب برای جمع‌آوری سریع و بدون مشکل پسماندهای غذایی تدوین کنند. باید از افراد داوطلبی که مایل هستند پسماندهای غذایی را به مراکز بازیافت اجتماعی ببرند، تشویق کنیم؛ تا هر روز این کار را انجام دهند. به این ترتیب، دفع پسماندهای غذایی به طریقی سریعتر و ساده‌تر انجام می‌شود (Karmee 2016).

۲-۹-۱ تفکیک پسماند مواد غذایی

در مناطق مختلف، پسماندهای غذایی به طور معمول با سایر پسماندهای جامد شهری ترکیب می‌شوند. برای فرآیندهای بیشتری مانند پردازش و استفاده بیشتر، نیاز به روش‌های مناسب

جداسازی و مرتب‌سازی پسماندهای غذایی از پسماندهای غیرزیستی وجود دارد. با توجه به تنوع و پیچیدگی پسماندهای غذایی، روش‌های جداسازی ممکن است بسته به نوع پسماندهای غذایی تولید شده، متفاوت باشد (Karmee 2016).

۱-۹-۳ منبع تجدید ناپذیر

پسماندهای غذایی منبعی تجدید ناپذیر است. با مدیریت بهتر در فرآیند تهیه و مصرف غذا، می‌توان پسماندهای غذایی را کاهش داد؛ اما برای راه‌اندازی واحدهای صنعتی بزرگ جهت بازیافت پسماندهای غذایی، نیاز به تأمین پایدار مقادیر زیادی از پسماندهای غذایی وجود دارد. حفظ یک صنعت بزرگ وابسته به پسماندهای غذایی در این شرایط عملی نیست. به عنوان یک راه حل، می‌توان رستوران‌ها و مجموعه‌های غذایی^۱ بزرگ را به کارخانه‌های تولید سوخت زیستی کوچک و متوسط متصل کرد. این کار همچنین هزینه حمل و نقل پسماندهای غذایی را کاهش می‌دهد (Karmee 2016).

۱-۹-۴ منبع غیر استاندارد

ترکیب پسماندهای غذایی وابسته به موقعیت جغرافیایی، عادات تغذیه و زمان‌های تغذیه می‌باشد. بنابراین قبل از استفاده از پسماندهای غذایی به عنوان منبعی برای تولید سوخت زیستی، باید ترکیب شیمیایی و مقادیر آب آن محاسبه شود. پسماندهای غذایی پیچیده‌تر از مواد اولیه سنتی مانند روغن‌های گیاهی، ذرت و مواد لیگنوسلولوزی هستند. برای تضمین تکرارپذیری نتایج، نیاز به یک سیستم جامع برای تعیین ویژگی‌های شیمیایی مختلف انواع پسماندهای غذایی وجود دارد (Karmee 2016).

۱-۱۰ چشم انداز آینده

به طور کلی، مواد اولیه خوراکی برای تأمین نیازهای سوخت زیستی مبادله می‌شوند. اما، باید تمرکز بر استفاده از پسماندهای غذایی غیرقابل مصرف برای تولید سوخت زیستی قرار گیرد. بررسی اقتصادی روش‌های "تبدیل پسماندهای غذایی به انرژی" باید به شیوه‌ای دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد؛ تا از قابلیت‌های تجاری، اجتماعی و اقتصادی آنها مطلع شویم. زباله‌های مواد غذایی ماهیت پیچیده و متنوعی دارند. ترکیب پسماند غذایی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند شرایط جغرافیایی و روش‌های تولید غذا، زمان برداشت یا جمع‌آوری

محصولات، عادات غذایی افراد در یک منطقه خاص قرار دارد. راهکارهای نوآورانه و اقتصادی مؤثر می‌توانند طراحی شوند؛ تا از طریق آن‌ها، پسماندهای غذایی به محصولات مفید تبدیل شوند (Yang et al. 2015). تعامل و همکاری بین موسسات تحقیقاتی مختلف مرتبط با شیمی کاتالیز، مهندسی ژنتیک، کاتالیز زیستی، بیوفناوری، فرایند استخراج و خالص سازی محصولات و مهندسی محیط زیست می‌تواند فناوری‌های پیشرفته و بهتری برای ارزش‌آفرینی از پسماندهای غذایی ارائه دهند. سازمان‌های عمومی، سازمان شهرداری، صنایع غذایی، سازمان‌های غیردولتی و نماینده دولت ملی باید آگاهی عمومی را درباره اهمیت پسماندهای غذایی، بازیافت آن‌ها و استفاده بیشتر از آن‌ها افزایش دهند. علاوه بر این، سازمان‌های دولتی باید قوانین و سیاست‌ها را تدوین کنند تا روشهایی را برای تشویق شرکت‌های نوپا، کارآفرینان و صنعتگران برای بهره‌گیری مؤثر از پسماندهای غذایی و ایجاد یک جامعه قوی و پایدار فراهم آورند.

کارایی میکروارگانیسم‌ها در بازده و نرخ تولید کمتر بوتانول و روغن‌ها موانع اصلی در تجاری سازی بیوبوتانول هستند. فناوری DNA نو ترکیب و روش‌های فنی فنی مهندسی ژنتیک می‌تواند برای بهبود دسترسی سویه‌ها به محلول‌ها و افزایش تولید بیواتانول استفاده شوند. فن آوری‌های استخراج بوتانول مانند استخراج مایع و جدا کردن گاز می‌تواند با فناوری تخمیر همراه باشد؛ تا تولید و عملکرد بوتانول را افزایش دهد.

سوخت‌های مایع در مقایسه با سوخت‌های جامد یا گازی، به طور مداوم به روز رسانی می‌شوند. در مقایسه با روش‌های تولید سوخت‌های بیوگاز، روش‌های تولید سوخت‌های مایع قابلیت انجام تبدیل بیشتر، تولید کمتر پسماند، و استفاده کمتر از فضا و آب را از خود نشان می‌دهند. قابلیت تجاری رشد سوخت‌های بیولوژیکی توسط عوامل مختلفی از جمله: قیمت مواد اولیه، امکانات‌های تولید، کیفیت محصول و تقاضای بازار تعیین می‌شود. استفاده از زباله‌های آلی به عنوان ماده اولیه برای تولید سوخت زیستی یک گزینه امیدوارکننده است (Malode et al. 2021).

چربیها، کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آمینه، فسفات‌ها، ویتامین‌ها و سایر مواد مغذی اجزای اصلی هر پسماند غذایی هستند. جداسازی و تصفیه هر جزء از زباله غذایی یک مرحله بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. (حلال‌های آلی فرار) برای جداسازی اجزا استفاده می‌شود؛ و برای انسان و محیط زیست مضر است. به عنوان یک گزینه مناسب و بهترین جایگزین، تولید بیودیزل، بیواتانول و روغن زیستی می‌تواند با ترکیب تمام مواد تشکیل دهنده پسماند غذایی بدون

جداسازی، تفکیک و خالص سازی هر جزء انجام شود. این روش به طور قطع روشی با هزینه کمتر و ساده تر برای تولید سوخت های زیستی است.

۱-۱۱ نتیجه گیری

پسماند مواد غذایی در تمام مراحل زنجیره تامین مواد غذایی تولید می شود. این پسماندها باعث مشکلات جدی اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی می شود. از آسیب های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای و آلودگی آب های زیرزمینی به دلیل پسماند مواد غذایی در محل های دفن زباله باید جلوگیری شود. تبدیل زیستی زباله های غذایی می تواند برای استخراج انرژی به شکل بیودیزل، هیدروژن، متان و اتانول انجام شود. منابع کربن، نیتروژن و چربی به عنوان ماده اولیه برای میکروارگانیسم ها در تولید سوخت زیستی استفاده می شوند.

تولید سوخت زیستی از زباله های غنی مغذی به صورت عملی و اقتصادی انجام می شود؛ و هزینه زباله غذایی تقریباً صفر یا کم است. با این حال، هنوز نگرانی هایی درباره هزینه و حمل و نقل زباله غذایی، طولانی بودن فرآیند و کارایی پایین وجود دارد. این نگرانی ها نیازمند توجه جدی هستند. واضح است که نیاز به تحقیقات درباره بهینه سازی فرآیند، کارایی عملکرد و ارتباط بین فرآورده های تولید و محصولات مفید وجود دارد. در حال حاضر، بخش چربی برای تولید بیودیزل استفاده می شود. قسمت های کربوهیدرات و پروتئین برای تولید گاز طبیعی، هیدروژن و بیوگاز مورد استفاده قرار می گیرند. این روش چند جانبه می تواند منجر به ایجاد یک اقتصاد با کاهش زباله غذایی و جامعه ای بیشتر بر پایه فناوری های زیستی شود. ارزش گذاری پسماند غذایی می تواند یک حوزه امکان پذیر امیدوارکننده باشد. این حوزه نیاز به تحقیقات در مقیاس آزمایشگاهی یا بزرگتر وجود دارد؛ تا توسط دولت ها و فعالان تجاری حمایت شود.

منابع

- Abdelaziz AEM, Leite GB, Hallenbeck PC (2013) Addressing the challenges for sustainable production of algal biofuels: II. Harvesting and conversion to biofuels. Environ Technol 34: 1807–1836.
- Allakhverdiev SI, Kreslavski VD, Thavasi V, Zharmukhamedov SK, Klimov VV, Nagata T, Nishihara H, Ramakrishna S (2009) Hydrogen photoproduction by use of photosynthetic organisms and biomimetic systems. Photochem Photobiol Sci 8:148–156.

- de Almeida VF, Garcia-Moreno PJ, Guadix A, Guadix EM (2015) Biodiesel production from mixtures of waste fish oil, palm oil and waste frying oil: optimization of fuel properties. *Fuel Process Technol* 133:152–160.
- Atsumi S, Higashide W, Liao JC (2009) Direct photosynthetic recycling of carbon dioxide to isobutyraldehyde. *Nat Biotechnol* 27:1177–1180.
- Awasthi P, Shrivastava S, Kharkwal AC, Varma A (2015) Biofuel from agricultural waste: a review. *Int J Curr Microbiol App Sci* 4(1):470–477.
- Boluda-Aguilar M, Lopez-Gomez A (2013) Production of bioethanol by fermentation of lemon(Citrus limon L.) peel wastes pretreated with steam explosion. *Ind Crop Prod* 41:188–197.
- Buijs NA, Siewers V, Nielsen J (2013) Advanced biofuel production by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Curr Opin Chem Biol* 17:480–488.
- Carere CR, Rydzak T, Verbeke TJ, Cice N, Levin DB, Sparling R (2012) Linking genome content to biofuel production yields: a meta-analysis a major catabolic pathways among select H2 and ethanol-producing bacteria. *BMC Microbiol* 12:295.
- Carlsson AS, van Beilen JB, Moller R, Clayton D (2007) Products. In: Bowles D (ed) *Micro- and macro-algae: utility for industrial applications, outputs from the EPOBIO project*. University of York. CPL Press, Newbury, pp 1–82.
- Cha M, Chung D, Elkins JG, Guss AM, Westpheling J (2013) Metabolic engineering of *Caldicellulosiruptor bescii* yields increased hydrogen production from lignocellulosic biomass. *Biotechnol Biofuels* 6:85.
- Chandrasekharan M (2012) *Valorization of food processing by products*. CRC Press, Boca Raton. ISBN:1439848874.
- Chen Y, Xiao B, Chang J, Fu Y, Lv P, Wang X (2009) Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using immobilized lipase in fixed bed reactor. *Energy Convers Manag* 50(3):668–673.
- Chisti Y (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv* 25:249–306.
- Demirbas A (2009) Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review. *Appl Energy* 86:S108–S117.
- Dragone G, Fernande B, Vicente AA, Teixeira JA (2010) Third generation biofuels from microalgae. In: Mendez-Vilas A (ed) *Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology*. Formatex, Badajoz, pp 1355–1366.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2014a) Food wastages footprint: full-cost accounting. <http://www.fao.org/3/a-i3991e.pdf>.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2014b) Food wastages footprint. impact on natural resources. <http://www.fao.org/docrep/018/i3347e/i3347e.pdf>.
- Gronenberg LS, Marcheschi RJ, Liao JC (2013) Next generation biofuel engineering in prokaryotes. *Curr Opin Chem Biol* 17:462–471.
- Hasunuma T, Okazaki F, Okai N, Hara KY, Ishii J, Kondo A (2013) A review of enzymes and microbes for lignocellulosic biorefinery and the possibility of their application to consolidated bioprocessing technology. *Bioresour Technol* 135:513–522.
- Heimann K (2016) Novel approaches to microalgal and cyanobacterial cultivation for bioenergy and biofuel production. *Curr Opin Biotechnol* 38:183–189.

- Hertel T, Golub A, Jones A, O'Hare M, Plevin R, Kammen D (2010) Effect of US maize ethanol on global land use and greenhouse gas emission: estimating market-mediated responses. *Bioscience* 60:223–231.
- Huang H, Khanna M, Onal H, Chen X (2013) Stacking low carbon policies on the renewable fuels standard: economic and greenhouse gas implications. *Energy Policy* 56:5–15.
- Ilmen M, den Hann R, Brevnova E, McBride J, Wiswall E, Froehlich A, Koivula A, Voutilainen SP, Siika-aho M, la Grange D, Thorngren N, Ahlgren S, Mellon M, Deleault K, Rajgarhia V, van Zyl WH, Penttila M (2011) High level secretion of cellobiohydrolases by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnol Biofuels* 4:30.
- Itelima J, Onwuliri F, Onwuliri E, Onyimba I, Oforji S (2013) Bio-ethanol production from banana, plantain and pineapple peels by simultaneous saccharification and fermentation process. *Int J Environ Sci Dev* 4:213–216.
- Karmee SK (2016) Liquid biofuel from food waste: current trends, prospects and limitations. *Renew Sust Energy Rev* 53:945–953.
- Karmee S, Lin C (2014) Valorisation of food waste to biofuel: current trends and technological challenges. *Sustain Chem Process* 2(1):22.
- Kim KC, Kim SW, Kim MJ, Kim SJ (2005) Saccharification of foodwastes using cellulolytic and amylolytic enzymes from *Trichoderma harzianum* FJ1 and its kinetics. *Biotechnol Bioprocess Eng* 10(1):52–59.
- Lin CSK, Pfaltzgraff LA, Herrero-Davila L, Mubofu EB, Abderrahim S, Clark JH, Koutinas AA, Kopsahelis N, Stamatelatos K, Dickson F, Thankappan S, Mohamed Z, Brocklesby R, Luque R (2013) Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energy Environ Sci* 6(2):426–464.
- Lindberg P, Park S, Melis A (2010) Engineering a platform for photosynthetic isoprene production in cyanobacteria, using *Synechocystis* as the model organism. *Metab Eng* 12:70–79.
- Liu H, Ma X, Li L, Hu Z, Guo P, Jiang Y (2014) The catalytic pyrolysis of food waste by microwave heating. *Bioresour Technol* 166:45–50.
- Mahmood T, Hussain ST (2010) Nanobiotechnology for the production of biofuels from spent tea. *Afr J Biotechnol* 9(6):858–868.
- Malode SJ, Prabhu KK, Mascarenhas RJ, Shetti NP, Aminabhavi TM (2021) Recent advances and viability in biofuel production. *Energy Convers Manage* X:10. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100070>.
- Molinuevo-Salces B, Riano B, Hijosa-Valsero M, Gonzalez-Garcia I, Paniagua-Garcia A, Hernandez D, Garita-Cambronero J, Diez-Antolinez R, Garcia-Gonzalez MC (2020) Valorization of apple pomaces for biofuel production: a biorefinery approach. *Biomass Bioenergy* 142: 105785.
- Nordic Energy Research (2019) Food waste to biofuel 102001217. 1–9.
- Ong KL, Kaur G, Pensupa N, Uisan K, Lin CSK (2018) Trends in food waste valorization for the production of chemicals, materials and fuels: case study south and Southeast Asia. *Bioresour Technol* 248(A):100–112.
- Papanikolaou S, Dimou A, Fakas S, Diamantopoulou P, Philippoussis A, Galiotou- Panayotou M, Aggelis G (2011) Biotechnological conversion of waste cooking olive oil into lipid-rich

- biomass using *Aspergillus* and *Penicillium* strains. *J Appl Microbiol* 110(5):1138–1150.
- Pleissner D, Lam WC, Sun Z, Lin CSK (2013) Food waste as nutrient source in heterotrophic microalgae cultivation. *Bioresour Technol* 137:139–146.
- Poudyal RS, Tiwari I, Koirala AR, Masukawa H, Inoue K, Tomo T, Najafpour MM, Allakhverdiev SI, Veziroglu TN (2015) Hydrogen production using photobiological methods. In: Subramani V, Basile A, Veziroglu TN (eds) *Compendium of hydrogen energy: hydrogen production and purification*. Woodhead Publishing series in energy, pp 289–317.
- Pourbafrani M, Forgacs G, Horvath IS, Niklasson C, Taherzadeh MJ (2010) Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresour Technol* 101:4246–4250.
- Prasoulas G, Gentikis A, Konti A, Kalantzi S, Dimitris K, Mamma D (2020) Bioethanol production from food waste applying multienzyme system produced on-site by *Fusarium oxysporum* F3 and mixed microbial cultures. *Fermentation* 6:39.
- Razeghifard R (2013) Algal biofuels. *Photosynth Res* 117:207–219.
- Razzak SA, Hossain MM, Lucky RA, Bassi AS, de Lasa H (2013) Integrated CO₂ capture, waste water treatment and biofuel production by microalgae culturing-a review. *Renew Sust Energ Rev* 27:622–653.
- Reddy LV, Reddy OVS, Wee YJ (2011) Production of ethanol from mango (*Mangifera indica* L.) peel by *Saccharomyces cerevisiae*. *Afr J Biotechnol* 10(20):4183–4189.
- Reena (2016) Biofuel from waste: a review. *Int J Recent Adv Eng Technol* 41(1):147–149.
- Seibert M (2009) Applied photosynthesis for biofuels production. In: Smith KC (ed) *Photobiological sciences online*. American Society of Photobiology.
- Shakharkar PA (2018) Treatment of food waste for bioethanol production using pervaporation separation technology. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 6(1):2568–2574.
- Shuang L, Yang X (2016) Biofuel production from the food waste. South China University of Technology, Guangzhou.
- Singh A, Nigam PS, Murphy JD (2011) Renewable fuels from algae: an answer to debatable and based fuels. *Bioresour Technol* 102:10–16.
- Skarlis S, Kondili E, Kaldellis JK (2012) Small-scale biofuel production economics: a case study focus on Crete Island. *J Clean Prod* 20:20–26.
- Slade R, Bauen A (2013) Micro-algae cultivation for biofuels: cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass Bioenergy* 53:29–38.
- Tai M, Stephanopoulos G (2013) Engineering the push and pull of lipid biosynthesis in oleaginous yeast *Yarrowia lipolytica* for biofuel production. *Metab Eng* 15:1–9.
- Tan YH, Abdullah MO, Nolasco-Hipolito C (2015) The potential of waste cooking oil- based biodiesel using heterogeneous catalyst derived from various calcined eggshells coupled with an emulsification technique: a review on the emission reduction and engine performance. *Renew Sust Energ Rev* 47:589–603.
- The State of Food and Agriculture (2008) *Biofuels: prospects, risks and opportunities*. pp 1–13. ISBN 978-92-5-105980-7.
- The State of Food and Agriculture (2019) *Food waste to biofuels*. Nardic Energy Research.
- Tran NH, Bartlett JR, Kannangara GSK, Milev AS, Volk H, Wilson MA (2010) Catalytic upgrading of biorefinery oil from micro-algae. *Fuel* 89:265–274.

- Tubb RS (1986) Amylolytic yeasts for commercial applications. *Trends Biotechnol* 4(4):98–104
- Unido Pollution from food processing factories (2001) pp 1–11. www.unido.org/fileadmin/import/3212925pollutionfromfoodprocessing.7.pdf.
- Verbeke TJ, Zhang X, Henrissat B, Spicer V, Rydzak T, Krokhin OV, Fristensky B, Levin DB, Sparling R (2013) Genetic evaluation of *Thermoanaerobacter* spp. for the construction of designer co-cultures to improve lignocellulosic biofuel production. *PLoS One* 8(3):e59362.
- Voloshin RA, Kreslavski VD, Zharmukhamedov SK, Bedbenov VS, Ramakrishna S, Allakhverdiev SI (2015) Photoelectrochemical cells based on photosynthetic systems: a review. *Biofuel Res J* 6:227–235.
- Wan Omar WNN, Saidina Amin NA (2011) Optimization of heterogeneous biodiesel production from waste cooking palm oil via response surface methodology. *Biomass Bioenergy* 35(3): 1329–1338.
- Wang LK, Hung Y, Howard H, Constantine Y (2006) Waste treatment in the food processing industries. CRC Press, Boca Raton. ISBN 9780849372360.
- Woodgate S, Van der Veen JF (2004) The role of fat processing and rendering in the European Union animal production industry. *Biotechnol Agron Soc Environ* 8(4):283–294.
- Yaakob Z, Mohammad M, Alherbawi M, Alam Z, Sopian K (2013) Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renew Sust Energ Rev* 18:184–193.
- Yang X, Choi HS, Park C, Kim SW (2015) Current states and prospects of organic waste utilization for biorefineries. *Renew Sust Energ Rev* 49:335–349.
- Ylitrvo P (2008) Production of ethanol and biomass from orange peel waste by *Mucor indicus*. Thesis of University College of Boras (School of Engineering), 181–300.

انرژی زیستی و فرآوری پسماند مواد غذایی

چکیده: اتلاف مواد غذایی یک مسئله جدی در سراسر جهان است؛ و پیش بینی می‌شود در ۲۵ سال آینده به دلیل رشد اقتصاد و جمعیت در سراسر جهان به طور قابل توجهی افزایش یابد. پسماندهای زیست تخریب پذیری که از منابع مختلفی مانند مناطق مسکونی، صنایع غذایی و هتل‌ها تولید می‌شوند، پسماندهای مواد غذایی شناخته می‌شوند. میوه‌ها و سبزیجات تازه، محصولات نانوائی، گوشت و محصولات لبنی از جمله اصلی‌ترین مواد غذایی هستند. این مواد غذایی در طول زنجیره تأمین غذا از بین می‌روند. در این فصل، به طور خلاصه در مورد پسماند کلی مواد غذایی صحبت می‌شود. به ویژه تمرکز بر پسماند حاصل از فرآوری مواد غذایی است؛ یعنی باقیمانده‌هایی که پس از پردازش محصولات اولیه در صنعت فرآوری مواد غذایی باقی می‌مانند. صنعت فرآوری مواد غذایی موجب تولید نسبت بالایی از زباله‌های جامد و مایع می‌شود. این زباله‌ها ناشی از آماده‌سازی، تولید و در نهایت مصرف غذا است. این زباله‌های متنوع شامل مواد مغذی مختلفی هستند. از این زباله‌ها می‌توان برای تولید و استخراج زیست توده ارزشمند استفاده کرد. با این حال، اگر این زباله‌ها بدون هیچگونه پردازش و مدیریتی رها شوند، تجزیه غیرکنترل‌شده آنها باعث آلودگی محیط زیست می‌شوند. بنابراین برنامه‌ریزی، مدیریت و استفاده صحیح از این پسماندهای صنایع تبدیلی غذایی به شیوه‌ای موثر، نیاز امروز برای کاهش برخی از مسائل گرسنگی و سوء تغذیه در کشور هند و سراسر جهان است.

واژه‌های کلیدی: انرژی زیستی، فرآوری پسماند مواد غذایی، پسماند میوه و سبزیجات، پسماند گوشت و لبنیات

۲-۱ مقدمه

در حال حاضر، جمعیت انسانی با چندین چالش در سطح جهانی مواجه است. انرژی و امنیت غذایی دو چالش اصلی هستند. این دو چالش نیازمند توجه فوری هستند؛ تا وضعیت بدتر نشود. همانطور که همه ما می‌دانیم، هم انرژی و هم غذا از نیازهای اساسی زندگی ما هستند؛ بنابراین دسترسی آسان و مقرون به صرفه به هر دو مورد برای حفظ جمعیت انسانی بسیار اهمیت دارد. این فصل تا حدودی روشن می‌کند که چگونه فرآوری مواد غذایی و پسماند غذایی می‌تواند مسائل انرژی را بدون به خطر انداختن امنیت غذایی و متعادل کردن وابستگی متقابل آن کاهش دهد. به دلیل افزایش سریع جمعیت انسان، تقاضا برای غذا و انرژی چندین برابر افزایش یافته است. علاوه بر افزایش تقاضا، روش مصرف غذا و انرژی نیز به طور چشمگیری تغییر کرده است. این امر منجر به بروز چالش‌های جدیدی شده است.

در چند دهه اخیر، تغییرات قابل توجهی در رفتار انتخاب غذا رخ داده است. هر روزه تعداد بیشتری از افرادی که به سلامتی خود اهمیت می‌دهند، به سوی محصولات غذایی زیستی^۱ و فرآورده‌های غذایی سالم تر از غذاهای معمولی استفاده می‌کنند. این تغییر در رفتار مصرف غذا در نهایت منجر به ائتلاف بی‌سابقه غذا می‌شود. طبق نظر سازمان غذا و کشاورزی (FAO)، یک سوم غذاهای تولید شده در سطح جهان هدر می‌رود. با وجود تلاش‌های مختلف برای کاهش ائتلاف مواد غذایی، هنوز حدود ۱/۳ میلیارد تن مواد غذایی از جمله میوه‌ها، سبزیجات، گوشت و محصولات لبنی و نانواپی هدر می‌رود. این پسماند در سطوح مختلفی از جمله تولیدات کشاورزی، برداشت، فرآوری، ذخیره‌سازی و ... تولید می‌شوند؛ بنابراین چگونگی استفاده از این مقادیر بالای پسماند غذایی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. موثرترین و پربازده ترین راه برای استفاده از این زباله‌های غذایی، تولید زیست توده به عنوان منبع تولید انرژی زیستی است. این زیست توده می‌تواند بدون نیاز به هر گونه پردازشی برای رشد میکروبی یا پردازش با آنزیم‌ها برای تولید انرژی زیستی، به صورت مستقیم استفاده شود. محصولات نهایی حاصل از این زباله‌های قابل فساد به صورت گازی یا مایع هستند. بنابراین تعیین کمیت، کیفیت و ویژگی‌های مواد اولیه قبل از اقدام به استفاده از آن‌ها بسیار مهم است؛ زیرا نوع فرایند و تبدیل آن به انواع مختلف سوخت‌های زیستی متفاوت است. انتخاب اولیه و

۱. غذای زیستی به فرآورده‌های کشاورزی گفته می‌شود که در تولید و فرآوری آن از کودهای شیمیایی، سموم، هورمون‌ها و دگرگونی‌ها و دستکاری‌های ژنتیکی استفاده نشود.

شناسایی پسماند مختلف بیوشیمیایی و فرآورده‌های تصفیه و مدیریت آن را می‌توان برای استخراج حداکثر انرژی از زباله‌هایی با منابع مفید مواد مغذی طراحی کرد (Singh et al. 2012).

پسماندهای مواد غذایی و کشاورزی نوعی پسماند زیست تخریب پذیر هستند. این پسماندها عمدتاً از مناطق مسکونی، واحدهای فرآوری مواد غذایی و هتل‌ها خارج می‌شوند. با توجه به چند دهه گذشته، وابستگی به زیست توده به عنوان منبع تولید انرژی یا ماده اولیه شیمیایی به طرز قابل توجهی افزایش یافته است. استفاده از این زیست توده عمدتاً برای مصارف غیرخوراکی خواهد بود؛ اما استفاده و تولید آن با دیگر مصادیق مانند تولیدات غذایی و خوراک رقابت می‌کند (Mahro and Timm 2007). بنابراین با ترکیب انواع مختلف پسماند غذایی یا پسماند زیستی برای تولید انرژی زیستی، تضاد غذا-خوراک-سوخت را می‌توان به حداقل رساند. در این زمینه، صنایع غذایی، به ویژه بخش فرآوری غذا، قابلیت تبدیل شدن به یک گزینه قابل اعتماد و مناسب را دارند؛ زیرا به طور ضروری هر روز مقادیر زیادی از باقیمانده‌های زیستی تولید می‌کنند. رشد سریع جمعیت و تغییرات پیوسته در عادات غذایی نسل‌های جوان، رشد بخش فرآوری غذا را به طور قابل توجهی تقویت می‌کند. با توجه به داده‌های اخیر، نرخ رشد سالانه متوسط در بخش فرآوری غذا حدود ۸/۴۱ درصد است؛ و نرخ رشد سالانه ترکیبی در کشور هند ۱۴/۶ درصد است. این مقدار به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از نرخ رشد جهانی است (Invest India National Investment Promotion and Facilitation Industry 2021).

با توجه به چشم‌انداز رشد آینده، پسماند صنعت فرآوری غذا می‌تواند به عنوان یک عامل کلیدی در رشد زیست توده و تولید انرژی زیستی مؤثر باشد؛ و در نتیجه به کاهش بخشی از مسائل امنیت انرژی که هر روز مردم عادی با آن روبرو هستند، کمک کند. یکی از مزایای مفید این پسماند و باقیمانده‌های زیستی فرآوری غذایی، دسترسی آسان به آن‌ها است؛ و معمولاً جمع‌آوری آن‌ها در شرایط کنترل شده صورت می‌گیرد؛ زیرا باقیمانده‌های مرطوب غذایی عموماً مناسب برای فرآیند سوزاندن و بازیافت حرارتی نیستند. از جنبه دیگر، ممکن است در کاهش هزینه‌های کلی مربوط به دفع زباله مؤثر باشد.

در این فصل، به بررسی امکانات مختلف برای استفاده مؤثر از باقیمانده‌های زیستی صنعت غذا و فرآوری پسماند آن می‌پردازیم و قابلیت آن‌ها به عنوان یک منبع زیست توده برای تولید انرژی زیستی را مورد بحث قرار می‌دهیم.

۲-۲ وضعیت کنونی فراوری پسماند غذا در هند و جهان

اتلاف غذا به حدی مسئله‌ای جدی شده است که با توجه به گسترش گرسنگی و سوءتغذیه در سراسر جهان، بسیار مهم است. انتظار می‌رود تولید مواد غذایی در جهان بتواند نیازهای ۷/۶ میلیارد نفر را در سراسر جهان تأمین کند؛ اما اتلاف غذا یکی از دلایل اصلی گرسنگی و سوءتغذیه است. طبق آمار سازمان خواربار و کشاورزی، سالانه ۱/۳ میلیارد تن مواد غذایی هدر می‌رود. علاوه بر این، سازمان خواربار و کشاورزی اعلام کرده است که حدود یک سوم کل تولید و تولید مواد غذایی جهان هدر می‌رود. این موضوع حدود ۷۵۰ میلیارد دلار از اقتصاد جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مشکل اتلاف غذا در کشورهای ثروتمند بیشتر جدی است؛ با این حال، تخمین زده می‌شود که شیوع همین مشکل در کشورهای در حال توسعه نیز در حال افزایش است. کشورهای در حال توسعه سریع مانند: هند و چین بیشترین پسماند مواد غذایی خانگی را هر سال تولید می‌کنند؛ اما حجم ثابت تولید پسماند غذایی به ازای هر نفر در این کشورها کمتر از ۷۰ کیلوگرم است. در مقابل، میانگین تولید پسماند غذایی در هر نفر در استرالیا تقریباً ۱۰۲ کیلوگرم در سال است. شکل ۲-۱ نشان دهنده تقریبی اتلاف غذای خانگی در برخی از کشورهای انتخاب شده در سراسر جهان است.



شکل ۲-۱. اتلاف غذا در کشورهای منتخب در کیلوگرم در سال، ۲۰۲۱

اتلاف غذا شامل پسماند قابل تجزیه زائد از منابع مختلف مانند مناطق مسکونی، صنایع غذایی، هتل و ... می‌باشد. میوه‌ها و سبزیجات تازه، محصولات نانوائی، گوشت و محصولات لبنی از جمله مهمترین مواد غذایی هستند که در طول زنجیره تأمین غذا از دست می‌روند (FAO 2012). انتظار می‌رود اتلاف غذا در ۲۵ سال آینده به طرز قابل توجهی به دلیل رشد اقتصاد و جمعیت در سراسر جهان افزایش یابد. کشورهای آسیایی، به ویژه هند و چین، بخش اصلی این مسئله می‌باشند. طبق مطالعه ی ملیک اوغلو و همکاران (2013)، رشد سالانه اتلاف غذا در مناطق شهری کشورهای آسیایی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ از ۲۷۸ میلیون تن به ۴۱۶ میلیون تن افزایش می‌یابد. در مجموع سالانه حدود ۱/۴ میلیارد هکتار از زمین‌های حاصلخیز و پربار (۲۸ درصد از مساحت کشاورزی جهان) برای تولید مواد غذایی هدر می‌رود. یکی از تأثیرات منفی عمده اتلاف مواد غذایی، تأثیر بر شرایط آب و هوایی است. هر سال، تخمین زده می‌شود که حدود ۳/۳ میلیارد تن دی‌اکسیدکربن در نتیجه پسماند مواد غذایی، به جو انتشار می‌یابد؛ و باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌شود. علاوه بر این، معمولاً به دلیل مدیریت ضعیف پسماند، اجزای اصلی پسماندهای جامد شهری عموماً در فضای باز سوزانده یا دور ریخته می‌شوند. این امر باعث ایجاد مشکلات جدی بهداشتی و زیست محیطی به‌ویژه در شهرهای بزرگ و کوچک می‌شود (Kumar and Goel 2009; Pattnaik and Reddy 2010; Kumar et al. 2009; Talyan et al. 2008; Agarwal et al. 2005). اتلاف غذا حاوی رطوبت بالا در صورت عدم نگهداری مناسب و سوزاندن، دی اکسین‌ها را آزاد می‌کند. به طور کلی، دی اکسین‌ها می‌تواند منجر به تخریب بیشتر منطقه و محیط زیست می‌شود. علاوه بر این، با سوزاندن تلفات غذایی، امکان استفاده مجدد از مواد مفید در آنها به طور کامل از بین می‌رود؛ و این امر می‌تواند منجر به کاهش ارزش اقتصادی آنها شود. بنابراین نیاز به روش‌های مناسب برای مدیریت تلفات غذایی وجود دارد (Ma et al. 2009).

محصولات روغنی، گیاهان بوته ای و ساقه‌ها در بین گروه‌های مواد غذایی بیشترین سطح پسماند را گزارش می‌کنند؛ سپس میوه‌ها و سبزیجات به دنبال آن قرار می‌گیرند. طبیعت فسادپذیر میوه‌ها و سبزیجات سطوح بالایی از پسماند را به وجود می‌آورد. می‌توان گفت که در میان تمام گروه‌های غذایی، محصولات روغنی و گیاهان بوته‌ای و ساقه‌ها، به خصوص گیاه ریشه نشاسته‌ای^۱ و سیب‌زمینی، به دلیل داده‌های قابل توجهی که برای این کالاها گزارش شده است، عوامل اصلی در ایجاد پسماند هستند. در واقع، گیاه ریشه نشاسته ای در ۲ یا ۳ روز پس از برداشت خراب و فاسد می‌شود. از سوی دیگر، سیب‌زمینی‌ها نیاز به مدیریت دقیق،

برخورد محافظتی و ذخیره‌سازی مناسب به ویژه در کشورهای در حال توسعه با آب و هوای گرم و مرطوب دارند؛ تا از وقوع پسماند بزرگ جلوگیری شود. شکل ۲-۲ خلاصه ای از مقدار و مواد غذایی معمولی هدر رفته بر اساس کالاهای مختلف را نشان می‌دهد (FAO 2019).

همانطور که در بالا اشاره شد، ائتلاف مواد غذایی یک مسئله جدی در سراسر جهان است؛ و وضعیت هند نگران کننده تر از روند جهانی است. در واقع، هند به عنوان دومین تولیدکننده غلات و میوه‌ها و تولیدکننده پیشرو در حوزه دام و تولیدات آبی، تنها ۲ درصد از کل محصولات تولید شده کشور خود را پردازش می‌کند. طبق برنامه توسعه سازمان ملل متحد، نزدیک به ۴۰ درصد از مواد غذایی تولید شده در هند هدر می‌رود. علاوه بر این، طبق آمار وزارت کشاورزی دولت هند، حدود ۵۰,۰۰۰ کرور روپیه ارزش غذا هر سال در این کشور هدر می‌رود. هر ساله حدود ۹ میلیارد دلار از تولید ناخالص داخلی کشور به دلیل ائتلاف غذا از بین می‌رود. تولید میوه و سبزیجات، دانه‌های روغنی و صید آبی از عوامل اصلی مسئول برای خسارت ناشی از ائتلاف غذا هستند (MOFPI 2015).



شکل ۲-۲. درصد پسماند مواد غذایی بر اساس کالاهای

علاوه بر این، ائتلاف غذا در کشورهای توسعه‌یافته و صنعتی شباهت بسیاری به کشورهای در حال توسعه دارد؛ اما تفاوت اساسی در میزان ائتلاف غذا بین کشورهای صنعتی و کشورهای در حال توسعه وجود دارد. در کشورهای توسعه یافته و صنعتی، بیش از ۴۰ درصد از هدررفت و ائتلاف غذا در بخش خرده‌فروشی و سطح مصرف‌کننده رخ می‌دهد؛ اما در کشورهای در حال توسعه، بیش از ۴۰ درصد از هدررفت غذا در سطح پس از برداشت و فرآیند تولید اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، به منظور فرآیندهای تبدیل زباله به منابع دیگر، داشتن اطلاعات دقیق و صحیح درباره حجم زباله موجود امری بسیار ضروری است. به طور خلاصه در مورد ائتلاف

کلی غذا صحبت می‌شود؛ اما تمرکز اصلی این فصل بر روی فرآوری پسماند مواد غذایی است. منظور از فرآوری پسماند مواد غذایی، باقی مانده‌هایی است که پس از فرآوری محصول اولیه در صنایع غذایی باقی می‌ماند. ما آگاهیم که صنایع فرآوری غذا درصد‌های قابل توجهی از پسماند جامد و مایع تولید می‌کنند. این پسماندها ناشی از آماده‌سازی، تولید و در نهایت مصرف غذا است. این اتلاف غذا در طول فرآوری عمدتاً به دلیل مشکلات آلودگی در حین ذخیره سازی، بسته بندی نامناسب و سیستم‌های حمل و نقل نامناسب است (Giotto et al. 2015). فرآوری پسماند مواد غذایی تقریباً از تمام موارد مصرف روزانه ما مانند: پوست میوه‌ها و سبزیجات، دانه‌ها، هسته‌ها، آب پنیر، استخوان، خون، آب فرآیند، پنیر سویا، لجن و فاضلاب تشکیل شده است. این زباله‌های متنوع شامل مواد مغذی مختلف ارزشمند برای تولید و فرآوری زیست توده هستند. پساب‌های مواد غذایی سرشار از اجزای زیست تخریب پذیر با اکسیژن موردنیاز بیولوژیکی^۱ و مقادیر اکسیژن موردنیاز شیمیایی^۲ هستند. اگر این زباله‌ها بدون هیچ گونه تصفیه و مدیریت رها شوند، تجزیه بی رویه آنها موجب آلودگی محیط زیست می‌شود؛ زیرا مواد سمی و متان را آزاد می‌کند (Waldron 2009). بنابراین برنامه‌ریزی مناسب، مدیریت و بهره‌برداری از پسماندهای صنعت فرآوری غذا به شیوه‌ای مؤثر، نیاز فوری جهت کاهش برخی از مشکلات گرسنگی و سوء تغذیه در هند و سراسر جهان است.

۲-۲-۱ سوخت‌های زیستی از پسماند پردازش مواد غذایی

سوخت‌های زیستی حاملان انرژی هستند. این سوخت‌ها انرژی حاصل از زیست توده را ذخیره می‌کنند؛ و منبع تجدیدپذیری از انرژی محسوب می‌شوند. سوخت‌های زیستی مایع شامل بیودیزل، بیواتانول، روغن زیستی و بیوبوتانول هستند؛ اما سوخت‌های زیستی گازی شامل متان، هیدروژن و هیتان هستند که در شکل ۲-۳ ارائه شده است.

۲-۲-۱ سوخت‌های زیستی مایع

بیواتانول:

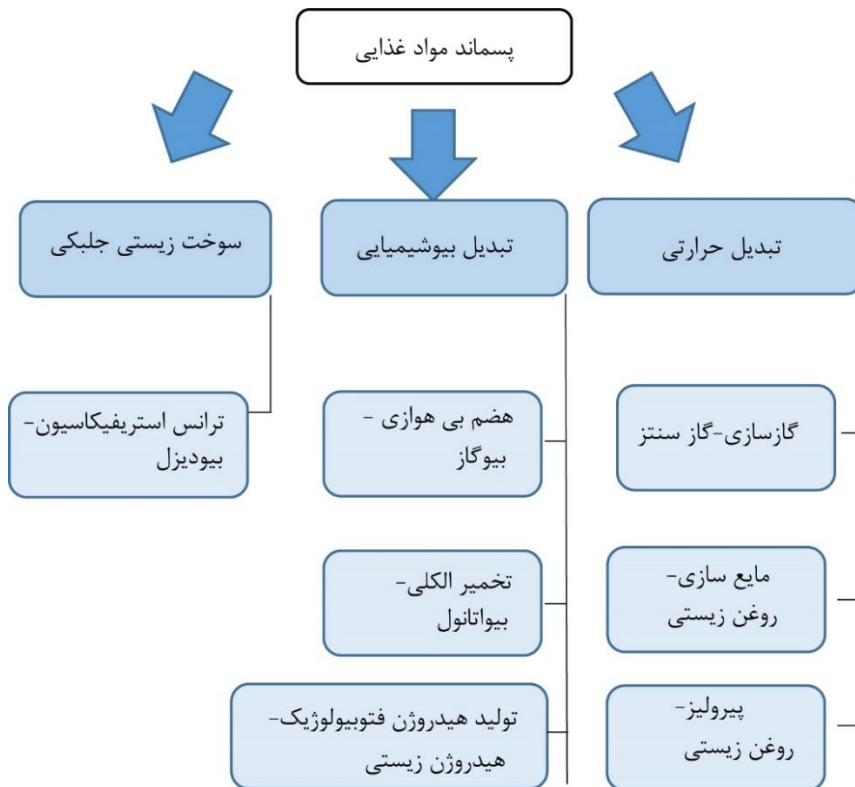
اتانول یا بیواتانول می‌تواند از هر منبع غذایی که شامل مقادیر قابل توجهی از قند یا پسماند غذایی حاوی نشاسته یا سلولز باشد، تولید شود. این منابع می‌توانند به قند تبدیل و برای تولید اتانول استفاده شوند. منابع اصلی برای تولید اتانول شامل نیشکر، چغندر قند، ذرت خوشه‌ای^۳،

1. BOD

2. COD

3. Sorghum

بالا^۱، گندم، گیاه ریشه نشاسته ای و پسماند غذایی مختلط هستند. به عبارت دیگر، این منابع زیست توده حاوی قندهایی هستند که به راحتی قابل تخمیر هستند. در مورد پسماند غذایی حاوی سلولز یا لیگنین، معمولاً مراحل شامل آماده سازی، هیدرولیز آنزیمی/فرآیند ساکارزی کردن، تخمیر و سپس تقطیر برای تولید اتانول است. هیدرولیز نشاسته می تواند با استفاده از آمیلازهایی مانند: آلفا-آمیلاز و بتا-آمیلاز انجام شود؛ و پس از آن، محصول هیدرولیز تحت فرآیند تخمیر قرار می گیرد.



شکل ۲-۳. توسعه سوخت زیستی

بیودیزل:

بیودیزل از متیل استرهای اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع بسته به منبع مواد اولیه تشکیل شده است. روغن های گیاهی خوراکی از جمله روغن های نخل، سویا، آفتابگردان و روغن های

1. Maize

غیرخوراکی گیاه دانه روغنی و درخت روغن معمولاً برای تولید بیودیزل استفاده می‌شوند. با این حال، استفاده از روغن‌های گیاهی خوراکی به عنوان ماده اولیه برای تولید بیودیزل ممکن است فرآیندی پرهزینه باشد؛ و جایگزین‌هایی مانند پسماند مواد غذایی و روغن‌های خوراکی مصرف شده ممکن است برای تولید آن استفاده شود. بیودیزل همچنین می‌تواند با فرآیند ترانس استریفیکاسیون روغن‌های میکروبی تولید شده توسط میکروارگانیسم‌های روغنی از جمله جلبک‌ها، قارچ‌ها و مخمرها تولید شود. در واقع، پسماند مواد غذایی می‌تواند به بیودیزل و اسیدهای چرب تبدیل شوند. این تبدیل معمولاً به سه روش انجام می‌شود. اولین روش استخراج چربیها با استفاده از آنزیم‌های لیپاز است. دومین روش فرآیند ترانس استریفیکاسیون است. این فرآیند با استفاده از کاتالیزورهای قلیایی یا اسیدی انجام می‌شود. سومین روش، ترانس استریفیکاسیون روغن‌های میکروبی تولید شده توسط سویه‌های مخمر است. استفاده از بیودیزل سودمند است؛ زیرا کربن خنثی است. یعنی سوخت پس از استفاده، کربن را به شکل دی اکسید کربن تولید نمی‌کند (Dar et al. 2019).

روغن زیستی:

روغن زیستی یک سوخت مایع با رنگ قهوه‌ای تیره است. از روش پیرولیز می‌توان برای تولید روغن زیستی از باقیمانده‌های زیستی مانند پسماند کشاورزی، پسماند زباله‌های شهری و پسماند جنگلی استفاده کرد. همچنین، پسماند مواد غذایی نیز می‌تواند از طریق پیرولیز و تجزیه حرارتی به گاز تبدیل شوند؛ و به عنوان منبع تولید روغن زیستی مورد استفاده قرار گیرند.

بیوبوتانول:

بیوبوتانول یا بوتانول یک سوخت الکلی نسل دوم است. این سوخت می‌تواند به عنوان سوخت حمل و نقل استفاده شود. بیوبوتانول توسط گونه‌های باکتری کلستریدیوم^۱ به وسیله تجزیه بی‌هوازی از کربوهیدرات‌های موجود در غلات، نیشکر، چغندر قند تولید می‌شود؛ و به استون، بوتانول و اتانول تبدیل می‌شود. از فرآوری پسماند مواد غذایی مانند خمیر غیر خوراکی^۲، نان و کره مایع^۳ نیز برای تولید بوتانول استفاده می‌شود (Dar et al. 2019).

1. Clostridium species

2. Inedible dough

3. Butter liquid

۲-۲-۱ سوخت‌های زیستی گازی

بیوگاز یا متان:

بیوگاز یا متان از هضم بی هوازی فرآوری پسماند مواد غذایی مانند پسماند صنایع میوه یا گوشت، پسماند سیب زمینی و پسماند آبجوسازی تولید می‌شود (Dar et al. 2019). متان یک منبع انرژی تجدید پذیر است. تولید متان منجر به یک هضم غنی از مواد مغذی می‌شود که ممکن است به عنوان کود استفاده شود. تولید متان در درجه اول شامل چهار مرحله است: هیدرولیز (مرحله محدود کننده سرعت به دلیل لیگنوسلولز، چربی‌های حیوانی و پروتئین موجود در زیست توده)، تولید اسید، تولید استات و تولید متان. عوامل مهم مرتبط با تولید اسید، تولید استات و تولید متان عبارتند از: نسبت کربن به نیتروژن، دما، pH، اسیدهای چرب فرار، آمونیاک و اسیدهای چرب با زنجیره بلند.

هیدروژن:

پس از احتراق هیدروژن، آب به عنوان محصول جانبی ایجاد می‌شود (Zhang et al. 2016). فرآوری پسماند مواد غذایی از جمله باقی مانده‌های پنیرسویا^۱، آب پنیر^۲، آب برنج^۳، آرد گندم، میوه ای از تیره انجیرها^۴، تفاله سیب و پسماند مواد غذایی آشپزخانه برای تولید هیدروژن زیستی استفاده شده است. اشاره شده است که پسماند غنی از کربوهیدرات قابلیت بیشتری برای تولید هیدروژن نسبت به زباله‌های مبتنی بر پروتئین و چربی دارند. هیدروژن می‌تواند به وسیله فرایندهای وابسته به نور و فرایندهای مستقل از نور تولید شود. مشاهده شده است که فرآیند تلفیقی نور-تاریکی جهت تولید هیدروژن از نظر اقتصادی موثر است. تولید هیدروژن به غلظت پسماند مواد غذایی، pH، دما، اسیدهای چرب قابل تبخیر و فشار جزئی هیدروژن حساس است.

هیتان:

هیتان مخلوطی از متان و ۲۵-۱۰ درصد هیدروژن از نظر حجم است که توسط هضم بی هوازی زباله‌های فرآوری مواد غذایی تولید می‌شود.

-
1. Tofu
 2. Cheese whey
 3. Rice slurry
 4. Jackfruit

۳-۲ منابع انرژی زیستی از پسماند مختلف مواد غذایی

با افزایش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی برای انرژی، سوخت‌های زیستی تولید شده به صورت بیولوژیکی از مواد آلی تجدید پذیر و زباله‌های آلی از میکروارگانیسم‌ها منبع سوخت سازگار با محیط زیست را فراهم می‌کنند. سوخت‌های زیستی تجدید پذیر و قابل تجزیه بوده و می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را محدود کنند؛ و کیفیت هوای محیط را بهبود بخشند. استفاده از پسماند پردازش غذا برای تولید انرژی زیستی، امکان استفاده موثر از حجم قابل توجهی از پسماند غذایی که در فرآیند پردازش ایجاد می‌شود را فراهم می‌کند.

۱-۳-۲ پسماند غلات و ارزن

در زمان برداشت، حدود ۲-۳ درصد از دانه‌های غلات هدر می‌روند. برداشت، عامل اصلی کاهش قابل توجه مواد غذایی قابل استفاده در تمام دسته‌های مواد غذایی است. در بیشتر کشورهای آفریقایی، در مورد دانه‌های غلات و حبوبات، کاهش اصلی مواد غذایی قابل استفاده در محل برداشت و در انبارهای ذخیره‌سازی در مزرعه بدون در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی و مکان جغرافیایی اتفاق می‌افتد. تکثیر آفات و اثرات بیماری‌ها، شرایط آب و هوایی نامناسب، برداشت نامناسب و کمبود نیروی کار یا منابع مالی، علل اصلی از دست دادن غلات هستند. درباره از دست دادن مواد غذایی در انبارهای ذخیره‌سازی در مزرعه، دلایل اصلی شامل امکانات ذخیره‌سازی ناکافی یا نامناسب مانند فاقد تهویه مناسب و عدم وجود شیوه‌های مناسب مدیریت می‌باشد (FAO 2019).

باقی مانده پسماند گیاه آن دسته از قسمت‌های گیاه هستند که پس از جداسازی بخش‌های قابل استفاده اقتصادی گیاهان، کنار گذاشته می‌شوند. آنها را می‌توان به طور گسترده در دو گروه طبقه بندی کرد: (الف) پسماند محصولات زراعی، شامل موادی که پس از جداسازی و برداشت بخش‌های قابل استفاده اقتصادی، همچنان در مزرعه باقی می‌مانند. مانند: ساقه‌ها و باقیمانده ساقه در زمین بعد از درو در مورد غلات؛ و (ب) باقی مانده‌های فرآوری شده شامل موادی که پس از جداسازی و برداشت از گیاه، به صورت اولیه کنار گذاشته می‌شوند؛ سپس از طریق فرآوری و تبدیل، به منابع قابل استفاده تبدیل می‌شوند. مانند: پوست یا پوسته خارجی تخم گیاه در مورد غلات (Shahane and Shivay 2016).

استفاده از زیست توده به عنوان ماده اولیه برای تولید بیواتانول، به عنوان یک روش پیشرفته فناوری در نظر گرفته می‌شود. به منظور جلوگیری از رقابت بین محصولات خوراکی، استفاده

از کاه و پسماندهای کشاورزی، مانند پوسته، بهترین گزینه برای تولید سوخت زیستی به جای استفاده از محصولات خوراکی است. ترکیب ذرت خوشه ای شیرین (شیره نیشکر) و تبدیل زیست توده ارزن انگشتی قابلیت تبدیل به یک حوزه تحقیقاتی امیدوارکننده را دارند.

محصولات فرعی غلات به عنوان منابعی از ترکیبات یا قسمت‌های مختلف با ارزش غذایی بالا شناخته می‌شوند که هنوز بهره‌برداری نشده‌اند. آنها می‌توانند به عنوان مواد جدید، در تولید سایر مواد غذایی و خوراک محصولات غیرغذایی نیز نقش مهمی داشته باشند. به غیر از صنعت مواد غذایی، استفاده از محصولات جانبی غلات می‌تواند به طور بالقوه یک منبع قابل اعتماد برای صنعت بیواتانول باشد. صنعت آردسازی به عنوان اصلی‌ترین تأمین کننده محصولات فرعی غلات شناخته شده است. قبل از آردسازی، دانه‌ها با استفاده از فرآیند الک کردن بر اساس مشخصات درجه‌بندی، جدا می‌شوند. در این فرآیند، دانه‌هایی که با مشخصات درجه‌بندی مورد نیاز سازگار نیستند، جدا می‌شوند؛ و به عنوان محصولات فرعی غلات شناخته می‌شوند. دیگر محصولات فرعی حاصل از آردسازی شامل سبوس و جوانه غلات هستند. معمولاً جوانه غلات به عنوان محصول فرعی، برای تولید روغن جوانه غلات استفاده می‌شود. در هر حال، محصول فرعی اصلی فرآیند آردسازی غلات، سبوس غلات است. سبوس شامل لایه پروتئین موجود در دانه‌ی گیاه و پوشش دانه‌ها است. سبوس غلات از آردسازی و پردازش دانه‌های غلات پس از جداسازی قسمت مغز دانه حاصل می‌شود. در فرآیند آردسازی، مراحل متعددی شامل تمیزکاری، جداسازی و درجه‌بندی قبل از پردازش دانه‌های غلات؛ و سپس مرحله الک کردن بر اساس روش جداسازی بر پایه اندازه عمل می‌کنند. به این معنی که ذرات با اندازه و ویژگی‌های مشابه با هم جدا می‌شوند. بسته به نوع کارخانه آردسازی استفاده شده، دانه‌های غلات به قطعات کوچکتر تقسیم می‌شوند. این عمل شامل برش، آسیاب کردن یا خرد کردن دانه‌ها به اندازه مشخص و مطابق با نیاز نهایی است. از این رو، در طی فرآوری غلات، این محصولات جانبی تولید می‌شوند. بر اساس مطالعه انجام شده توسط میت و همکاران (2009)، مشاهده شد که هنگامی که اندازه ذرات آرد کوچکتر می‌شود، مقدار بیشتری از نشاسته آسیب دیده تولید می‌شود. این موضوع باعث کاهش سطح مقادیر سولفیدریل پروتئین گلوتن می‌شود که در نتیجه ویژگی‌های کیفی آرد‌ها تغییر می‌کند.

در فرآیند پردازش ذرت، دو نوع روش فنی آردسازی، شامل آردسازی مرطوب و آردسازی خشک استفاده می‌شود. استفاده از این روش‌های فنی در پردازش ذرت، بر اساس محصول نهایی مورد نظر تعیین می‌شود. بطور معمول، برای به دست آوردن قسمت درون دانه ذرت، از روش آردسازی خشک به طور کلی استفاده می‌شود. محصول نهایی به عنوان آرد، وعده‌های

غذایی، یا بلغور استفاده می‌شود. استفاده از این محصولات نهایی منجر به تولید بخش‌های سبوس ذرت می‌شود. برای به دست آوردن جوانه ذرت از طریق آردسازی مرطوب استفاده می‌شود. جوانه، یک فرآورده جانبی است که بیشتر برای تولید روغن استفاده می‌شود. همچنین، در هنگام جداسازی روغن از جوانه ذرت، فرآورده باقی‌مانده به نام "کیک" تولید می‌شود که معمولاً از فرآوری غلات به دست می‌آید (Papageorgiou and Da Rocha, n.d.).

صنعت آردسازی با استفاده از فرآیند آردسازی خشک ذرت، مقدار زیادی سبوس ذرت تولید می‌کند؛ تا به افزایش تقاضای برای آرد ذرت پاسخ دهد. سبوس ذرت می‌تواند یک منبع قابل توجه برای پلیمرها باشد. این پلیمرها اصولاً شامل ۵۰ درصد هتروکسیلان و ۲۰ درصد سلولز هستند. ترکیبات زیست‌فعال مفید، به خصوص اسیدهای فنولیک مانند: اسید دیفرولیک و اسید فروئیک توسط سبوس ذرت فراهم می‌شوند. این ترکیبات زیست‌فعال می‌توانند در صنعت غذا به عنوان مواد افزودنی مفید استفاده شوند (Saulnier et al. 1995). علاوه بر این، با استخراج هتروکسیلان‌ها از سبوس ذرت، شیره سبوس ذرت محلول در آب قابل استفاده در صنعت غذا تولید می‌شود. این یکی دیگر از محصولات جانبی قابل استفاده در صنعت غذا است (Carvajal-Millan et al. 2007). شیره سبوس ذرت کاربردهای فناوریانه گسترده‌ای در صنایع غذایی، مکمل غذایی و دارویی دارد. همچنین، شیره سبوس ذرت می‌تواند ترکیبات زیست‌فعال را به دستگاه گوارش منتقل کند؛ و در روده جذب شوند. علاوه بر صنعت آردسازی، ذرت و محصولات جانبی که از آرد ذرت به دست می‌آیند، بزرگترین منبع تولید بیواتانول و سوخت‌های تجدیدپذیر مانند بیودیزل و بیوگاز هستند؛ بنابراین پسماندهای مختلف دانه‌ها و غلات در صنایع مربوطه نباید به عنوان مواد کاملاً پسماندی در نظر گرفته شوند. زیرا می‌توان از محصولات جانبی مختلف آنها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، به عنوان منابع جایگزین برای تولید سوخت‌های تجدیدپذیر استفاده کرد.

۲-۳-۲ فرآوری پسماند میوه و سبزیجات

طبق گزارش سازمان غذا و کشاورزی^۱، پسماندهای میوه و سبزیجات بخش قابل توجهی از پسماندهای غذایی را تشکیل می‌دهند. این مواد قابل تجزیه‌پذیر به مقدار زیادی تولید می‌شوند؛ با این حال، بیشتر پسماندها در فضای باز قرار داده می‌شوند؛ تا پوسیده شوند. به گفته سازمان غذا و کشاورزی، باقیمانده‌های میوه و سبزیجات نقش قابل توجهی در باقیمانده‌های غذایی دارند. این مواد قابل تجزیه‌پذیری هستند؛ و به میزان قابل توجهی تولید می‌شوند. با این

حال، بیشترین مقدار از این باقیمانده‌ها در فضای باز به منظور تجزیه رها می‌شوند. این نوع رها کردن در فضای باز مشکلات زیادی را در داخل و اطراف منطقه به دلیل انتشار بوی نامطبوع ایجاد می‌کند. علاوه بر این، باعث جذب پرندگان، موش‌ها، خوک‌ها و ... می‌شود؛ و نهایتاً به عنوان ناقلان و پخش‌کنندگان انواع بیماری‌ها مشکلات بزرگی ایجاد می‌کنند. مواد غذایی پس از برداشت و در حین حمل و نقل و به علت کمبود ظرفیت ذخیره‌سازی، فرآوری و بسته‌بندی میوه و سبزیجات بر اساس نیازهای خاص مشتریان، به عنوان یکی از عوامل اصلی تولید زباله در نظر گرفته می‌شوند. پسماند اصلی شامل مواد فاسد شده، پوست‌ها، پوسته‌ها و بخش‌های داخلی سبزیجات یا مواد مایع است. این پسماند می‌تواند از طریق تخمیر تحت شرایط کنترل شده برای تولید سوخت زیستی پردازش شوند. می‌توان از این پسماند برای کمپوست‌سازی استفاده کرد. این کمپوست‌ها می‌توانند محصولاتی با مقادیر بالای هوموس تولید کنند. این هوموس‌ها از طریق تجزیه طبیعی توسط میکروب‌ها ایجاد می‌شوند. طبق تحقیقات، این زیست‌توده با مقادیر غنی از کربوهیدرات و تجزیه طبیعی می‌تواند منبع مناسبی برای تولید انرژی تجدیدپذیر باشد. با این حال، پسماند سبزیجات و میوه یک گروه ویژه از زیست توده هستند. بنابراین برای استفاده به عنوان منبع قابل اعتماد مواد خام، نیاز به توصیف دقیق، شناخت کامل ترکیب و خصوصیات آنها وجود دارد. در نتیجه، می‌توان یک روش مناسب و مؤثر برای استفاده صحیح از آن ارائه داد. به همین دلیل، درک صحیح از ترکیب پسماند بسیار مهم است؛ و برای بهره‌برداری بهینه و سینتیک واکنش‌های زیستی در هنگام هضم بسیار اهمیت دارد. مانند هر زباله دیگری، مشخصات پسماند میوه و سبزیجات را می‌توان از نظر شیمیایی، فیزیکی یا بیولوژیکی مشخص کرد. در پسماند جامد، مشخصات فیزیکی، تخمین حجم، رطوبت، وزن، کل جامدات، جامدات فرار، بو، خاکستر، دما، رنگ و ... به طور معمول در نظر گرفته می‌شوند؛ اما برای زباله‌های مایع، جامدات محلول و معلق تخمین زده می‌شوند. در شناسایی زباله‌های مایع، کدورت پارامتر مهم دیگری است که باید در نظر گرفته شود. در خصوصیات شیمیایی پسماند مواد غذایی، اندازه گیری همی سلولز، سلولز، نشاسته، پروتئین، قندهای احیا کننده، کل ترکیبات آلی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، pH، هالوژن‌ها، فلزات سمی، نیتروژن و ... بررسی می‌شود. علاوه بر این، به غیر از این پارامترهای بیوشیمیایی، کلسیم، کربن، فسفر، گوگرد، پتاسیم و منیزیم می‌توانند آزمایش شوند.

به علاوه، درک پارامترهای بیوشیمیایی و شیمیایی مختلف پسماند، به ما اطلاعاتی درباره کاربرد و قابلیت استفاده از این پسماند در تولید انرژی مشخص را فراهم می‌کند. این امر می‌تواند فرصت‌های اشتغال را نیز به وجود آورد.

علاوه بر این، وجود پاتوژن‌ها و سایر ارگانیسم‌ها در شناسایی بیولوژیکی پسماند غذایی نشان دهنده آلودگی است. برخی از ویژگی‌های مشترک اشکال مختلف پسماند غذایی شامل غنی بودن از پروتئین، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی بالا، مولکول‌های زیستی چربی و کربوهیدرات‌ها با تغییرات pH قابل مشاهده است. طبق مطالعه جوشی و همکاران (1999)، پسماند صنایع فرآوری سبزیجات از جمله نخودفرنگی، گوجه‌فرنگی و هویج، حاوی مقدار بالایی از اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی هستند؛ همچنین منبع غنی از تعداد زیادی مواد مغذی اساسی مانند مواد معدنی، فیبر، ویتامین‌ها و ... می‌باشند. بنابراین یک مطالعه جامع برای تعیین کاربرد و امکان اقتصادی فرایند از ویژگی‌های پسماند بسیار مهم است. برخی از خصوصیات شیمیایی پسماند میوه و سبزیجات در جدول ۱-۲ آورده شده است.

با توجه به فرآوری میوه، ۳۰ تا ۵۰ درصد محصولات جانبی بسته به نوع میوه فرآوری شده تولید می‌شود (Chatanta et al. 2008). اینها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: (الف) فرآیند پیش‌پردازش که شامل ساقه‌ها، میوه‌های فاسد و ساقه‌های حاصل از فرآیندهای جداسازی و (ب) فرآیند پردازش که شامل خمیر، دانه‌ها، پوست‌ها و تفاله می‌باشد. علاوه بر این، در کارخانه‌های فرآوری میوه، نشاسته‌ها، پکتین، شکرها، ویتامین‌ها و سایر اجزای دیواره سلولی، از جمله اجزای اصلی فرآیند آب‌گیری است.

جدول ۱-۲. مشخصات شیمیایی پسماند میوه و سبزیجات

منابع	پروتئین (درصد)	نشاسته (درصد)	همی سلولز (درصد)	سلولز (درصد)	ضایعات مواد غذایی
Schieber et al. (2001), Thassitou and Arvanitoyannis (2001)	۱۷-۲۲	۱۰-۱۸	۵-۱۸	۳۰-۳۲	گوجه فرنگی
Vallejo et al. (2004), Panda (2005)	۳-۵	۳۰-۴۰	۱۰-۱۵	۱۷-۲۵	پوست سیب زمینی
Llorach (2004), Ma et al. (2009)	۵-۸	۱-۲	۱۲-۱۹	۱۳-۵۲	هویج

منبع: استفاده از پسماند گیاهی برای تولید انرژی زیستی (صفحات ۲۱۳ تا ۲۲۲) (برگرفته از Singh et al. 2012 تحقیقات کشاورزی)

در صنایع فرآوری مواد غذایی، عملیات تولید مواد غذایی انواع مختلفی از پسماند را تولید می‌کند. این نشان دهنده انواع مختلفی از فرآورده‌ها و مواد تشکیل دهنده است که به دلیل

چنین عملیات پردازشی انجام می‌شود. به عنوان مثال، شستن سبزیجات ریشه ای مانند چغندر قند باعث افزایش سطح جامدات محلول کل^۱ در پساب می‌شود. علاوه بر این، انجام پردازش اضافی سبزیجات، مانند خرد کردن/ پوست کندن، می‌تواند منجر به افزایش مواد جامد محلول (مانند شکر در فراوری میوه) شود.

علاوه بر این، حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد آب در پسماند میوه و سبزیجات وجود دارد؛ اما مقادیر چربی و پروتئین بسیار کمتر است (Mirabella et al. 2014). در هنگام فراوری، فرآورده‌های جانبی تولید شده ویژگی‌های شیمیایی طبیعی خود را مانند مواد خام حفظ می‌کنند. ترکیب‌های مختلف برخی از زباله‌های غذایی رایج در جدول ۲-۲ ذکر شده است. طبق یک مطالعه، پوست سیب زمینی حاوی ۶۴/۵ درصد کربوهیدرات، ۳/۴ درصد قند، ۱۳/۵ درصد پروتئین، ۷/۶ درصد خاکستر و ۱۱/۲ درصد رطوبت است (Mabrouk and El Ahwany 2008).

با این حال، ترکیبات فرآورده‌های جانبی می‌تواند بسته به محل جغرافیایی، شرایط رشد، انواع سیب‌زمینی و عوامل دیگر، متغیر باشد. به طور معمول، بخش عمده‌ای از سیب‌زمینی‌ها برای تغذیه دام استفاده می‌شود (Al-Weshahy and Rao 2012). علاوه بر این، در پسماند گیاه ریشه نشاسته ای، بیشترین مقدار شامل آب و الیاف غذایی غیرقابل حل است؛ اما در پوست گیاه ریشه نشاسته ای، الیاف خام با مقدار حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد (براساس مقدار خشک) و مقادیر پروتئین کمتر از ۶ درصد (براساس مقدار خشک) وجود دارد. در باقی مانده‌های میوه، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) در مقایسه با پسماند سبزیجات افزایش یافته است. سبزیجات و میوه‌ها از نظر مقادیر گوگرد و نسبت کربن به نیتروژن ویژگی‌های منحصر به فردی را نشان می‌دهند. با این حال، تمام نمونه‌های میوه و سبزیجات، مقادیر بهینه گوگرد و نیتروژن را به عنوان مواد اولیه برای هضم بی‌هوازی نشان نمی‌دهند. نسبت بهینه کربن به نیتروژن باید کمتر از ۲۵ باشد و نسبت بهینه نیتروژن به گوگرد^۲ باید ۱۵-۲۰ باشد (Deublein and Steinhauser 2011). طبق گزارش دار و همکاران (2019)، سیب‌زمینی‌ها خصوصیات منحصر به فردی در مقایسه با سایر مواد مورد بررسی دارند. و ۲۱/۸ درصد از کل مواد جامد، ۱۷/۴ درصد از مواد جامد قابل فرار بر مبنای رطوبت و نسبت کربن به نیتروژن ۲۳ را برای سیب زمینی گزارش کردند.

1. TSS

2. (N/S)

جدول ۲-۲. پسماند میوه و سبزیجات، محصولات فرعی و استفاده از آنها

منابع	منابع مورد استفاده	قسمت استفاده شده	سبزیجات
Çinar (2005)	بتاکاروتن، کومارین‌ها و هیدروکسی سینامات‌ها	تفاله	هویج
Salim et al. (2017)	اسیدهای کلروژنیک، گالیک، پروتوکاتچونیک و کافئیک. آنتی اکسیدان‌ها	پوست	سیب زمینی
Schieber et al. (2001), Baysal et al. (2000)	لیکوپن، بتاکاروتن، مشتقات هیدروکسی سینامیک اسید، فلاونول‌ها (مشتقات کوئرستین)، فلاوانون‌ها و نارینژنین کالکون	دانه‌ها و پوست میوه له شده و خشک شده	گوجه فرنگی
Erlund (2004), Tapiero et al. (2004)	فلاونوئیدها (کوئرستین) و ترکیبات ارگاتوسولفور	بافت‌های پوسته و غشای خارجی	پیاز
Schieber et al. (2001)	بتالین‌ها، بتاسیانین‌ها، بتازانتین‌ها، اسید کوماریک، مشتقات گلوکوزید سیکلودوپا، اسید فرولیک	تفاله و پوست	چغندر قرمز
Llorach (2004)	کافئویل کونینیک اسید؛ مشتقات کافئویل تارتاریک اسید؛ فلاون‌ها و فلاونول‌ها؛ اسید کلروژنیک و اسید کاسنی	قسمت فوقانی، ساقه و برگ‌های خارجی کاهو با کیفیت پایین	کاهو
Vallejo et al. (2004)	هیدروکسی سینامات‌ها (سیناپیک اسید)، ایزوتیوسیانات‌ها و فلاونوئیدهای گلیکوزیده	گل‌های کوچک، ساقه‌ها، برگ‌ها با کیفیت پایین	شلغم
Kammerer et al. (2005), Aliakbarian et al. (2012)	اسیدهای چرب اشباع نشده، پلی فنل‌ها، فیبر غذایی، فلاونوئیدها مانند کاتچین، پروآنتوسیانیدین‌ها و اپی کاتچین‌ها	پوست، دانه‌ها، گوشته و ساقه‌ها	تفاله انگور
Bhushan et al. (2008)	فلاونوئیدها، اسید کلروژنیک، گلیکوزیدها، پکتین‌ها، شیرین کننده‌های طبیعی، آنتی اکسیدان‌ها، اسانس‌ها و فیبرها	تفاله سیب، کیک سیب فشرده ^۱	فرآوری آب سیب

۱. به توده‌ای از سیب که پس از فشاردهی و استخراج شیره یا آب‌میوه به جا می‌ماند.

۲-۳-۳ فرآوری پسماند لبنیات

چندین کشور رشد در بخش لبنیات را به دلیل افزایش تقاضای مصرف کنندگان برای محصولات لبنی مشاهده کرده‌اند. فرآوری محصولات لبنی، مانند تخمیر شیر، فرآوری فرآورده‌های جانبی، تهیه پنیر و تهیه کنسانتره^۱ آب پنیر، منجر به فرآوری پسماند می‌شود. پساب صنایع لبنی ممکن است شامل مواد جامد و آلی معلق، باقیمانده کلرید سدیم، نیتروژن، فسفر، باقیمانده محصولات پاک کننده (شوینده، ضدعفونی کننده)، و محصولات جانبی مانند کنسانتره آب پنیر، روغن‌ها و چربی‌ها باشد. پسماندها، به ویژه پسماندهای آلی تولید شده از صنعت لبنی، ممکن است تهدیدی برای محیط زیست باشند؛ زیرا می‌توانند منجر به کاهش اکسیژن محلول^۲ در آب شوند. کاهش اکسیژن محلول می‌تواند منجر به تولید مثل پشه‌ها و مگس‌ها شود؛ و در نتیجه بیماری‌هایی مانند مالاریا، دنگی^۳ و ویروس چیکونگونیا^۴ را گسترش دهد. علاوه بر این، نیترات، آمونیاک و نیتروژن موجود در شیر خام، در هنگام فرآوری به عنوان پسماند از بین می‌روند؛ و ممکن است به نیتريت تبدیل شوند. نیتريت منجر به آلودگی آبهای زیرزمینی می‌شود. علاوه بر این، پسماند لبنی غلیظ نیز سمی شناخته شده است. تولید اتانول یا بیواتانول با استفاده از مخمر، مقدار انرژی مصرفی کمتری نسبت به متان و هیدروژن دارد. به دلیل نرخ تولید بالا اتانول یا بیواتانول، می‌توان آن را به عنوان سوخت حمل و نقل استفاده کرد. در حقیقت، پسماندهای لبنی غنی از لاکتوز با استفاده از سویه‌های مخمر که آنزیم‌های هیدرولیز لاکتوز را تولید می‌کنند، به منظور تولید اتانول استفاده شده‌اند. مطالعات با استفاده از پودر آب پنیر به عنوان پیش نیاز برای تولید اتانول در جدول ۲-۳ ارائه شده است. چندین مطالعه نشان داده‌اند که استفاده از گونه‌های جلبکی در تصفیه و استفاده از پسماندهای لبنی، مانند تولید بیودیزل با کیفیت بالا و در عین حال کاهش بار آلودگی، ظرفیت بسیاری را دارد (Ding et al. 2021; Dong et al. 2016; Kothari et al. 2012).

جدای از استفاده از سویه‌های مخمر و ریزجلبک برای استفاده از پسماند لبنی، برخی مطالعات استفاده از تجزیه بی‌هوازی پسماند چربی را برای تولید بیومتان (منبع تجدید پذیر انرژی)

۱. شکلی از ماده است که اکثر اجزای اصلی تشکیل‌دهنده یا حلال آن را حذف کرده‌اند. معمولاً با گرفتن آب موجود در یک محلول یا سوسپانسیون، مثلاً گرفتن آب موجود در آبمیوه و تبدیل آن به پودر یا عصاره، کنسانتره تشکیل می‌شود.

2. DO

3. Dengue

4. Chikungunya

گزارش کرده اند. این پسماند چربی معمولاً از غلظت بالایی از مواد آلی، عمدتاً چربیها و پروتئینها تشکیل شده اند. پسماند چربی ممکن است به فرایندهای آماده سازی مانند هیدرولیز آنزیمی، تصفیه اسیدی و قلیایی شدن نیاز داشته باشند.

جدول ۲-۳. پسماند و محصولات فرعی لبنیات و کاربرد آنها

منابع	پردازش	ضایعات	محصول
Ozmihci and Kargi (2007)	تخمیر با استفاده از مخمر <i>کلویرومایس فر/زلیس</i> ^۱	ضایعات آب پنیر	بیواتانول
Minakshi and Shilpa (2012)	تخمیر با استفاده از مخمر (کاندیدا) / <i>ینکانسپیکو</i> (W16) ^۲	ضایعات آب پنیر	بیواتانول
Shen et al. (2019)	بهینه سازی محیط با استفاده از باکتری <i>کورینباکتریوم گلوتامیکوم</i> ^۳	شیرابه آب پنیر با لاکتوز کم	بیواتانول
Foda et al. (2010)	پرورش با استفاده از باکتری (کلوستریدیوم استتوبیوتیکوم DSM 792) ^۴	آب پنیر	بیوباتانول
Kothari et al. (2012); Lu et al. (2015)	کشت با جلبک کلرلا پیرنوئیدوزا	فاضلاب	زیست توده و سوخت زیستی
	پرورش با استفاده از جلبکهای ریز <i>اکوتودسموس دیمورفوس</i> ^۵	فاضلاب	
Balasubramanian et al. (2018)	استخراج، پالایش و بهینه سازی چربی	لجن فعال لبنیات	بیودیزل

1. Kluyveromyces fragilis

2. Candida inconspicua W16

3. Corynebacterium glutamicum

4. Clostridium acetobutylicum DSM 792

5. Acutodesmus dimorphus

۲-۴ عوامل موثر بر تولید سوخت‌های زیستی

عوامل مختلفی که بر تولید سوخت‌های زیستی تأثیر می‌گذارد:

۱- **دما:** در تولید سوخت‌های بیولوژیکی، به ویژه تولید اتانول، دما نقش مهمی دارد. تخمیر با استفاده از مخمر، باید در دمای بهینه ۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام شود. به طور مشابه، تولید هیدروژن زیستی در دمای میانه (۳۷-۳۰ درجه سانتی‌گراد) منجر به بازده بالاتر با هزینه انرژی کم می‌شود (Dar et al. 2019). فعالیت باکتری‌های اسید لاکتیک در دمای بالا کاهش می‌یابد؛ اما فعالیت باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن افزایش می‌یابد. دمای بهینه برای تولید بیودیزل بین ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد است؛ و دمای بهینه ۵۵ درجه سانتی‌گراد است؛ زیرا افزایش دما بیش از این مقدار، منجر به کاهش بازده شده و باعث تبخیر متانول می‌شود.

دمای کمتر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد منجر به بازده کمتر می‌شود؛ و افزایش دما باعث افزایش نرخ تبدیل می‌شود. تولید متان از طریق هضم بی‌هوازی گرمادوست (۷۰-۵۵ درجه سانتی‌گراد) نسبت به هضم دمای میانه (۳۷ درجه سانتی‌گراد) مزیت بیشتری دارد؛ زیرا باعث افزایش سرعت واکنش و ظرفیت تحمل بار بیشتر می‌شود. با این حال، چندين محدودیت از جمله اسیدی شدن، پایداری کمتر، تولید متان ضعیف و حساسیت به شرایط محیطی دارد.

۲- **pH:** pH بهینه برای تولید اتانول از ۴ تا ۵ متغیر است، اما برای تولید متان ۷/۴-۶/۸ برای هضم بی‌هوازی است. pH بهینه برای تولید متان ۷ است. هنگامی که سطح pH کمتر از ۶/۶ می‌شود، نرخ رشد متان کاهش می‌یابد. pH بهینه برای تولید اسید در تولید متان ۵/۵-۶/۵ است.

۳- **نسبت کربن به نیتروژن:** هضم بی‌هوازی برای تولید بیوگاز به نسبت کربن به نیتروژن حساس است.

۴- **سرعت هیدرولیز:** تولید هیدروژن با سرعت هیدرولیز محدود می‌شود. هیدرولیز مواد غنی از کربوهیدرات سریعتر از مواد غنی از پروتئین و چربی است. تولید بیودیزل ممکن است شامل هیدرولیز قارچی پسماند غذایی با استفاده از قارچ *آسپرژیلوس آواموری*^۱ و *آسپرژیلوس*

1. *Aspergillus awamori*

اوریز^۱ برای جداسازی چربی و هیدرولیز مواد غذایی غنی از کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آمینه باشد. همچنین، آنزیم لیپاز برای کاتالیز هیدرولیز در تولید بیودیزل استفاده می‌شوند؛ و لیپازهای غیرفعال را می‌توان برای چرخه‌های زیادی برای استفاده مجدد قرار داد. به همین ترتیب در تولید بیواتانول، هیدرولیز یک مرحله کلیدی است. در این مرحله نشاسته به کربوهیدرات‌ها هیدرولیز می‌شود.

۵- آماده سازی: فرآیندهای آماده سازی در تولید سوخت‌های بیولوژیکی، به ویژه هیدروژن، اهمیت دارند. حذف باکتری‌های مصرف‌کننده هیدروژن یک مرحله مهم است؛ زیرا رشد باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، جهت تولید اتانول، معمولاً از فرآیندهای پیچیده آماده‌سازی قبل از هیدرولیز آنزیمی جلوگیری می‌شود؛ زیرا ممکن است به تجزیه جزئی قندها منجر شود.

منابع

- Agarwal A, Singhmar A, Kulshrestha M, Mittal AK (2005) Municipal solid waste recycling and associated markets in Delhi, India. *Resour Conserv Recycl* 44(1):73–90.
- Aliakbarian B, Fathi A, Perego P, Dehghani F (2012) Extraction of antioxidants from winery wastes using subcritical water. *J Supercrit Fluids* 65:18–24.
- Al-Weshahy A, Rao VA (2012) Potato peel as a source of important phytochemical antioxidant nutraceuticals and their role in human health-a review. In: *Phytochemicals as nutraceuticals* global approaches to their role in nutrition and health. InTech, London.
- Balasubramanian R, Sircar A, Sivakumar P, Anbarasu K (2018) Production of biodiesel from dairy wastewater sludge: a laboratory and pilot scale study. *Egypt J Pet* 27(4):939–943.
- Baysal TANER, Ersus SEDA, Starmans DAJ (2000) Supercritical CO₂ extraction of β -carotene and lycopene from tomato paste waste. *J Agric Food Chem* 48(11):5507–5511.
- Bhushan S, Kalia K, Sharma M, Singh B, Ahuja PS (2008) Processing of apple pomace for bioactive molecules. *Crit Rev Biotechnol* 28(4):285–296.
- Carvajal-Millan E, Rascón-Chu A, Márquez-Escalante JA, Micard V, de León NP, Gardea A (2007) Maize bran gum: extraction, characterization and functional properties. *Carbohydr Polym* 69(2):280–285.
- Chatanta DK, Attri C, Gopal K, Devi M, Gupta G, Bhalla TC (2008) Bioethanol production from apple pomace left after juice extraction. *Int J Microbiol* 5(2):1–5.
- Çınar I (2005) Effects of cellulase and pectinase concentrations on the colour yield of enzyme extracted plant carotenoids. *Process Biochem* 40(2):945–949.

1. *Aspergillus oryzae*

- Dar RA, Yaqoob M, Parmar M, Phutela UG (2019) Biofuels from food processing wastes. In: Microbial fuel cells: materials and applications, vol 46. Materials Research Foundations, pp 249–288.
- Deublein D, Steinhauser A (2011) Biogas from waste and renewable resources: an introduction. Wiley, New York.
- Ding L, Lin H, Zamalloa C, Hu B (2021) Simultaneous phosphorus recovery, sulfide removal, and biogas production improvement in electrochemically assisted anaerobic digestion of dairy manure. *Sci Total Environ* 777:146226.
- Dong T, Knoshaug EP, Davis R, Laurens LML, Van Wycken S, Pienkos PT et al (2016) Combined algal processing: a novel integrated biorefinery process to produce algal biofuels and bioproducts. *Algal Res* 19:316–323.
- Erlund I (2004) Review of the flavonoids quercetin, hesperetin, and naringenin. Dietary sources, bioactivities, bioavailability, and epidemiology. *Nutr Res* 24(10):851–874.
- FAO (2012) Towards the future we want: end hunger and make the transition to sustainable agricultural and food systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2019) Sustainable bioenergy potential in Zambia. pp 1–276.
- Foda MI, Dong H, Li Y (2010) Study the suitability of cheese whey for bio-butanol production by Clostridia. *J Am Sci* 6:39–46.
- Giroto F, Alibardi L, Cossu R (2015) Food waste generation and industrial uses: a review. *Waste Manag* 45:32–41.
- Invest India National Investment Promotion and Facilitation Industry, 17 March 2021. <https://www.investindia.gov.in/sector/food-processing>.
- Joshi VK, Pandey A, Sandhu DK (1999) Fermentation technology for food industry waste utilization. In: Biotechnology: food fermentation, microbiology, biochemistry and technology, vol 2. Educational Publishers & Distributors, New Delhi, pp 1291–1348.
- Kammerer D, Claus A, Schieber A, Carle R (2005) A novel process for the recovery of polyphenols from grape (*Vitis vinifera* L.) pomace. *J Food Sci* 70(2):C157–C163.
- Katami T, Yasuhara A, Shibamoto T (2004) Formation of dioxins from incineration of foods found in domestic garbage. *Environ Sci Technol* 38(4):1062–1065.
- Kothari R, Pathak VV, Kumar V, Singh DP (2012) Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production. *Bioresour Technol* 116:466–470.
- Kumar KN, Goel S (2009) Characterization of municipal solid waste (MSW) and a proposed management plan for Kharagpur, West Bengal, India. *Resour Conserv Recycl* 53(3):166–174.
- Kumar S, Bhattacharyya JK, Vaidya AN, Chakrabarti T, Devotta S, Akolkar AB (2009) Assessment of the status of municipal solid waste management in metro cities, state capitals, class I cities, and class II towns in India: an insight. *Waste Manag* 29(2):883–895.
- Llorach R, Tomás-Barberán FA, Ferreres F (2004) Lettuce and chicory byproducts as a source of antioxidant phenolic extracts. *J Agric Food Chem* 52(16):5109–5116.

- Lu W, Wang Z, Wang X, Yuan Z (2015) Cultivation of *Chlorella* sp. using raw dairy wastewater for nutrient removal and biodiesel production: characteristics comparison of indoor bench-scale and outdoor pilot-scale cultures. *Bioresour Technol* 192:382–388.
- Ma H, Wang Q, Qian D, Gong L, Zhang W (2009) The utilization of acid-tolerant bacteria on ethanol production from kitchen garbage. *Renew Energy* 34(6):1466–1470.
- Mabrouk ME, El Ahwany AM (2008) Production of 946-mannanase by *Bacillus amyloliquefaciens* 10A1 cultured on potato peels. *Afr J Biotechnol* 7(8):1123.
- Mahro B, Timm M (2007) Potential of biowaste from the food industry as a biomass resource. *Eng Life Sci* 7(5):457–468.
- Melikoglu M, Lin CSK, Webb C (2013) Analysing global food waste problem: pinpointing the facts and estimating the energy content. *Central Eur J Eng* 3(2):157–164.
- Minakshi D, Shilpa V (2012) Comparative analysis of bioethanol production from whey by different strains of immobilized thermotolerant yeast. *Int J Sci Res Publ* 2:1–5.
- Ministry of Food Processing Industries (MOFPI) (2015) Annual report 2016–17 <http://mofpi.nic.in/documents/reports/annual-report>. Accessed 10 March 2021.
- Mirabella N, Castellani V, Sala S (2014) Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *J Clean Prod* 65:28–41.
- Ozmihci S, Kargi F (2007) Effects of feed sugar concentration on continuous ethanol fermentation of cheese whey powder solution (CWP). *Enzym Microb Technol* 41(6–7):876–880.
- Panda H (2005) The complete book on managing food processing industry waste, 1st edn. National Institute of Industrial Research, New Delhi.
- Papageorgiou M, Da Rocha JF (n.d.) Topic review processing of cereals and derived-by-products subjects: food chemistry.
- Pattnaik S, Reddy MV (2010) Assessment of municipal solid waste management in Puducherry (Pondicherry), India. *Resour Conserv Recycl* 54(8):512–520.
- Salim NSM, Singh A, Raghavan V (2017) Potential utilization of fruit and vegetable wastes for food through drying or extraction techniques. *Novel Tech Nutr Food Sci* 1:1–12.
- Saulnier L, Vigouroux J, Thibault JF (1995) Isolation and partial characterization of feruloylated oligosaccharides from maize bran. *Carbohydr Res* 272(2):241–253.
- Schieber A, Stintzing FC, Carle R (2001) By-products of plant food processing as a source of functional compounds—recent developments. *Trends Food Sci Technol* 12(11):401–413.
- Shen J, Chen J, Jensen PR, Solem C (2019) Development of a novel, robust and cost-efficient process for valorizing dairy waste exemplified by ethanol production. *Microb Cell Factories* 18(1):1–10.
- Shahane AA, Shivay YS (2016) Cereal residues-not a waste until we waste it: a review. *Int J Bioresour Stress Manage* 7(1):162.
- Singh A, Kuila A, Adak S, Bishai M, Banerjee R (2012) Utilization of vegetable wastes for bioenergy generation. *Agric Res* 1(3):213–222.
- Talyan V, Dahiya RP, Sreekrishnan TR (2008) State of municipal solid waste management in Delhi, the capital of India. *Waste Manag* 28(7):1276–1287.

- Tapiero H, Townsend DM, Tew KD (2004) Organosulfur compounds from Alliaceae in the prevention of human pathologies. *Biomed Pharmacother* 58(3):183–193.
- Thassitou PK, Arvanitoyannis IS (2001) Bioremediation: a novel approach to food waste management. *Trends Food Sci Technol* 12(5–6):185–196.
- Vallejo F, Gil-Izquierdo A, Pérez-Vicente A, García-Viguera C (2004) In vitro gastrointestinal digestion study of broccoli inflorescence phenolic compounds, glucosinolates, and vitamin C. *J Agric Food Chem* 52(1):135–138.
- Waldron KW (ed) (2009) *Handbook of waste management and co-product recovery in food processing*. Elsevier, Amsterdam.

از پسماند میوه و سبزیجات تا تولید سوخت زیستی: بخش اول

چکیده: سبزیجات و میوه‌ها نقش مهمی در زندگی انسان دارند. تولید سبزیجات و میوه‌ها در سراسر جهان نیز افزایش یافته است؛ تا نیازهای جمعیت در حال گسترش را تامین کند. افزایش تولید میوه‌ها و سبزیجات نیز به دلیل عدم استفاده از روش‌های صحیح جابجایی باعث افزایش اتلاف آنها شده است. اتلاف سبزیجات و میوه‌ها، نشان دهنده هدر رفت غذا بدون مصرف و هدر رفت آب، زمین، کود، انرژی و تلاش است. دفع پسماند میوه و سبزیجات تهدید جدی برای محیط زیست به وجود آورده است. به عنوان مثال، دفع آنها در مکان‌های دفن زباله منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود؛ و تهدیدی برای محیط زیست محسوب می‌شود. علاوه بر این، تجزیه آنها باعث انتشار بوهای نامطبوع شده و هوا، آب و خاک را آلوده می‌کند. در نتیجه، عوامل بیماری زای مضر به شدت افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پسماندهای میوه و سبزیجات را می‌توان برای استخراج محصولات مفید و زیست فعال (ضد ویروسی، ضد باکتری، ضد جهش زا و ...) استفاده کرد. محققان قابلیت پسماند میوه و سبزیجات را در تولید سوخت‌های زیستی، یعنی بیواتانول، هیدروژن زیستی، بیودیزل و بیوگاز کشف کرده‌اند؛ زیرا آنها سرشار از مواد آلی هستند. پسماند میوه و سبزیجات می‌توانند به راحتی توسط میکروب‌ها به روش تخمیر به سوخت‌های زیستی تبدیل شوند. سوخت‌های زیستی تولید شده از پسماند میوه و سبزیجات را می‌توان برای پخت و پز، حمل و نقل و همچنین تولید انرژی و برق استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پسماند میوه و سبزیجات، سوخت زیستی، بیواتانول، هیدروژن زیستی، بیودیزل، بیوگاز

اختصارات

CFU	واحدهای تشکیل دهنده کلونی
CO	مونوکسید کربن
CPW	پسماند پوست مرکبات
CSF	ساکاره سازی و تخمیر متوالی
CW	پسماند مرکبات
DAP	آماده سازی اسید رقیق
DF	تخمیر مستقیم
ETAAS	طیف سنجی جذب اتمی الکتروترمال
ET-ICP-MS	طیف سنجی جرمی با استفاده از پلاسمای جفت شده القایی - بخارسازی الکتروترمال
FAO	سازمان غذا و کشاورزی
FL	ازبین رفتن غذا
FLW	از دست دادن و هدر رفتن مواد غذایی
FSC	زنجیره تامین مواد غذایی
FSCW	پسماند زنجیره تامین مواد غذایی
FVW	پسماند میوه و سبزیجات
FW	زباله‌های مواد غذایی
GHG	گاز گلخانه‌ای
LCA	ارزیابی چرخه حیات
LHW	تصفیه آب گرم مایع
SF	فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر
SSF	فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان
TSS	کل جامد محلول

۳-۱ مقدمه

بحران جهانی انرژی باعث نگرانی جدی در سراسر جهان شده است. جمعیت جهان پیوسته به شدت در حال گسترش است؛ و فشار زیادی بر تقاضای منابع انرژی وارد می‌کند. منابع موجود انرژی برای چند دهه از سوخت‌های فسیلی تأمین شده؛ اما استفاده بیش از حد از آن‌ها سوالاتی درباره قابلیت دسترسی آن‌ها در آینده ایجاد می‌کند (Guo et al. 2015). استفاده مداوم از سوخت‌های فسیلی و فرآورده‌های جانبی آن به دلیل تجمع گازهای گلخانه‌ای در

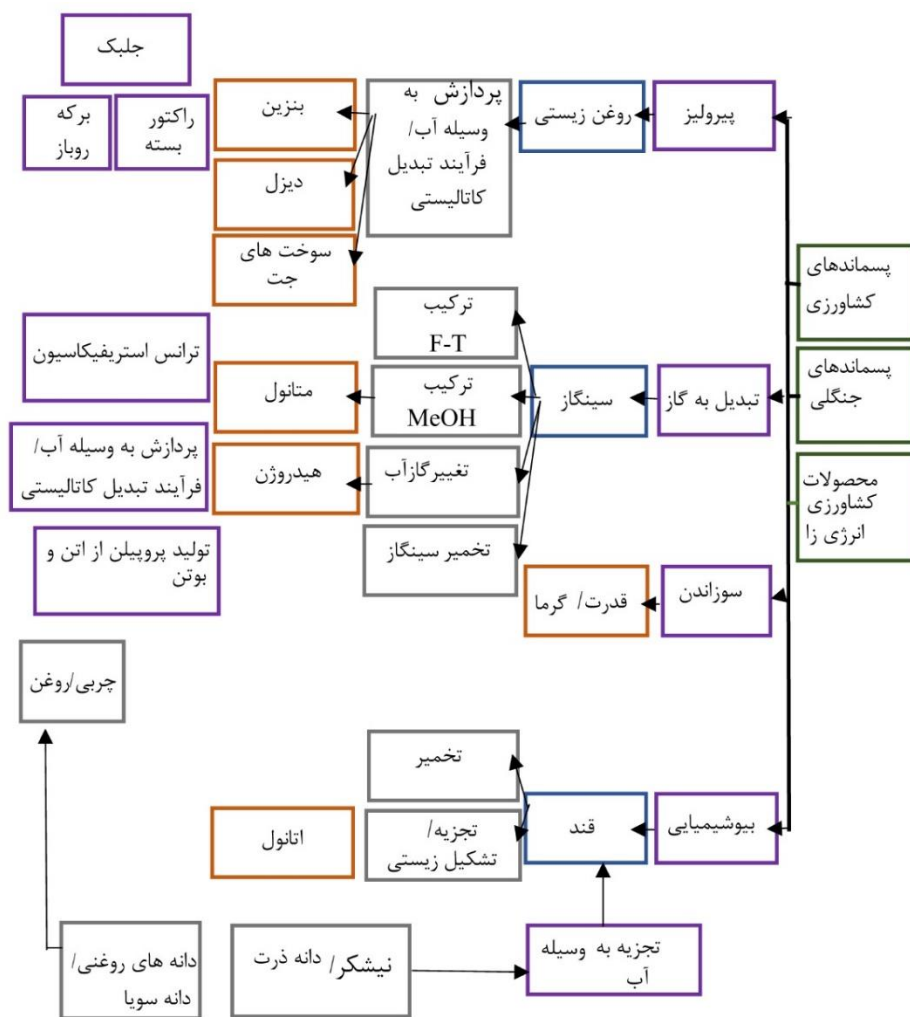
اتمسفر، محیط را تغییر می‌دهد؛ و منجر به تغییرات اقلیمی، افزایش آب سطح دریاها و افزایش دما می‌شود (Voloshin et al. 2015). سوخت‌های نفتی منبع نهایی انرژی برای حمل و نقل کالاها و انسان‌ها هستند؛ و وابستگی به آن‌ها پیوسته در حال افزایش است. بیش از ۸۰ درصد از مصرف جهانی سوخت‌های نفتی به بنزین اختصاص دارد؛ و تولید برق و حرارت نیز درصد بیشتری از گازهای گلخانه‌ای را به جو منتشر می‌کند (Gunay et al. 2019). گازوئیل و بنزین در حمل و نقل کالا و انسان بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. این امر تهدیدی برای کاهش سوخت‌های فسیلی برای نسل آینده است. استفاده بیش از حد سوخت‌های فسیلی و محصولات جانبی آن‌ها، به همراه کاهش سریع آن‌ها، باعث افزایش تقاضا برای منابع جایگزین انرژی شده است. سوخت‌های زیستی به عنوان منابع تجدیدپذیر انرژی که می‌توانند جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند، تولید می‌شوند. تحقیقات زیادی در سرتاسر جهان انجام شده؛ و همچنان ادامه دارد؛ تا منابعی را جستجو کنند که بتوانند به عنوان سوخت زیستی عمل کنند. سوخت‌های زیستی سازگار با محیط زیست بوده؛ و می‌توانند تغییرات آب و هوایی را محدود کنند. محققان تخمین زده اند که استفاده از سوخت‌های زیستی تا سال ۲۰۵۰ به ۳۰ درصد افزایش یابد (Isah and Ozbay 2020).

اثبات شده که، پسماند غذایی می‌تواند به عنوان یک منبع جایگزین و تجدیدپذیر برای سوخت‌های زیستی عمل کنند. بخش عمده ای از پسماند جامد که در شهرداری‌ها تولید می‌شود، پسماند غذایی هستند. بخش زیادی از پسماند مواد غذایی در سرتاسر جهان تولید می‌شوند. امروزه، دفن ایمن پسماند مواد غذایی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها است (Karmee 2016). مکان‌های دفن زباله یا دستگاه‌های زباله سوز، عمدتاً مکان‌های اصلی برای دفع پسماند غذایی هستند. سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد تخمین زده است که حدود ۱/۳ میلیارد تن پسماند غذایی بدون استفاده دور ریخته می‌شوند. با رشد و توسعه روزافزون جمعیت و افزایش توانمندی‌ها در سراسر جهان، افزایش قابل توجهی در تولید پسماند غذایی مشاهده شده است. تولید جهانی پسماند غذایی در حدود ۱۳۰۰ میلیون تن است (Melikoglu et al. 2013). دفع پسماند مواد غذایی در محل‌های دفن زباله نگرانی‌های جدی در جامعه را ایجاد کرده است. این نگرانی‌ها شامل آلودگی هوا، نشت شیرابه و ایجاد بوی نامطبوع می‌باشند. محل‌های دفن زباله دی اکسید کربن، متان و سایر گازهای سمی را تولید می‌کنند. علاوه بر این، این محل‌ها فضای بزرگی را نیز اشغال می‌کنند. این امر، در شهرهای بزرگ منجر به مشکلاتی می‌شود. بنابراین بازیافت و استفاده مجدد از پسماند غذایی و کشف فناوری‌هایی که قادر به تبدیل پسماند غذایی به منابع تجدیدپذیر انرژی هستند، ضروری است.

(Katami et al. 2004). محققان در حال تلاش برای یافتن راهکارهایی هستند؛ تا بتوانند پسماند غذایی را از طریق هضم بی هوازی، سوزاندن و خوراک دام مجدداً استفاده کنند. اخیراً مشخص شده است که پسماند غذایی می‌توانند به سوخت زیستی تبدیل شوند؛ همچنین، سوخت‌های زیستی می‌توانند به عنوان سوخت به صورت خالص یا مخلوط با موتورهای دیزل استفاده شوند (Pham et al. 2015). سوخت‌های زیستی منابع تجدیدپذیر انرژی هستند. سوخت‌های زیستی توسط فعالیت میکروبی از مواد آلی پسماند تولید می‌شوند. سوخت‌های زیستی تجدیدپذیر و قابل تجزیه هستند؛ و مقادیر قابل قبولی از گازهای خروجی تولید می‌کنند. سوخت‌های زیستی به عنوان منابعی که می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را محدود کنند؛ و کیفیت هوا را با تولید انرژی قابل توجه بهبود بخشند، تولید شده‌اند. سوخت‌های زیستی برای پایداری اقتصادی و محیط زیست ضروری هستند. به نظر می‌رسد تبدیل زیستی زباله‌های غذایی به سوخت زیستی یک روش امیدوارکننده برای کاهش هزینه انرژی باشد (شکل ۳-۱).

۳-۲ تعریف، تولید و تأثیر پسماند غذایی

پسماند غذایی بخش اجتناب ناپذیری از مواد غذایی است که از زنجیره تامین مواد غذایی حذف می‌شود. پسماند غذایی از زیست توده‌هایی تشکیل شده که می‌تواند به خط انتقال فاضلاب، محل‌های دفن زباله و دریا دفع شود. همچنین، پسماند غذایی برای کمپوست سازی، برداشت محصول، تولید انرژی زیستی، هضم بی هوازی و سوزاندن مجدد استفاده می‌شود (Lin and Tanaka 2006). پسماند غذایی شامل آن دسته از اجزای اقلام غذایی است که از زنجیره تامین غذایی برای تولید مواد شیمیایی مبتنی بر زیستی و خوراک دام حذف می‌شوند. بنابراین منطقی است که از واژه پسماند زنجیره تامین مواد غذایی استفاده شود. پسماند زنجیره تامین مواد غذایی شامل انواع پسماند تولید شده توسط زنجیره تامین مواد غذایی می‌باشد. این پسماند زنجیره تامین مواد غذایی می‌توانند توسط صنعت پردازش مواد غذایی برای تولید مواد خام و توزیع محصول استفاده شوند (Maina et al. 2017). اتلاف غذا به کاهش کیفیت و کمیت غذا اشاره دارد؛ اما اتلاف پسماند غذا می‌توان به مجموع بخش‌های قابل مصرف غذا که در همه مراحل زنجیره تأمین غذا حذف یا از بین برده می‌شود، اشاره کرد. فرآورده‌های پسماند غذا می‌توانند به مواد با ارزش تبدیل شوند. بسیاری از نویسندگان برای اشاره به پسماند میوه و سبزیجات از عبارت "پسماند میوه و سبزیجات" استفاده می‌کنند، اما نویسندگان مختلف از عبارات متفاوتی استفاده می‌کنند.



شکل ۳-۱. تبدیل زیست توده به سوخت های زیستی (برگرفته از Yue et al. 2014)

به تخمین سازمان غذا و کشاورزی، هر ساله در سطح جهان حدود ۱/۳ میلیارد تن غذا دور ریخته و هدر می رود. از این مقدار، ۸۸ میلیون تن در اتحادیه اروپا غذا هدر می رود. و با توجه به روند فعلی، انتظار می رود در آینده این مقادیر به نسبت ۴۰ درصد افزایش یابند (Plazzotta et al. 2017). برآورد ائتلاف پسماند مواد غذایی ۱۷۰ میلیون تن در آمریکای شمالی است. در ایالات متحده آمریکا، ائتلاف و پسماند غذا ۳۰ تا ۵۰ درصد تخمین زده می شود (Muth et al. 2019). نتایج سازمان غذا و کشاورزی نشان می دهد که آمریکای

شمالی و اقیانوسیه در رتبه اول در میان مناطق جهان از نظر ارزش پسماند و اتلاف غذا قرار دارند؛ و پس از آن، اروپا و فدراسیون روسیه، ژاپن، چین، جمهوری کره، آمریکای لاتین، آفریقای شمالی و غربی، آسیای مرکزی، آفریقای جنوبی و آسیای شرقی قرار دارند (Blakeney 2019). در کشورهای در حال توسعه، در طی مراحل برداشت و فرآوری، مقادیر قابل توجهی از پسماند میوه و سبزیجات تولید می‌شود. اما فقط ۱۰ درصد از این پسماند در مرحله مصرف تولید می‌شود. علت اصلی از دست دادن این حجم زیاد میوه و سبزیجات شامل شرایط نامناسب ذخیره‌سازی، تسهیلات فرآوری نامناسب و امکانات ناکافی است (Zhao et al. 2011). در کشورهای صنعتی، خسارات میوه و سبزیجات در مراحل برداشت و مصرف نسبت به مرحله فرآوری بسیار بیشتر است (Giroto et al. 2015). تولید پسماند میوه و سبزیجات وابسته به ماهیت استانداردهای غذایی است که توسط تولیدکنندگان مصرف‌کنندگان تعیین می‌شود. با سخت‌گیری بیشتر در استانداردهای غذایی، احتمال تولید کمتر پسماند میوه و سبزیجات نیز امکان پذیر است. به عنوان مثال، در ایالات متحده آمریکا، هر ساله ۴۵ میلیون تن از میوه‌ها، سبزیجات تازه، غلات و محصولات لبنی هدر می‌رود. به طور مشابه، در هند، این مقدار سالانه ۵/۶ میلیون تن است (Kosseva 2013). پسماند میوه و سبزیجات معمولاً شامل تفاله نیشکر، انگور، تفاله چغندر قند، روغن تفاله زیتون، گوجه فرنگی، مواد باقی مانده از روغن گیری خرما، سیب، پوسته هسته خرما، تفاله سیب زمینی، خمیر گیاه ریشه نشاسته‌ای و پوست آناناس و مرکبات است (Pramanik and Rao 2005). کمیت جهانی امنیت مواد غذایی و گروه کارشناسان سطح بالا درباره امنیت غذایی و تغذیه، تأثیر اتلاف و پسماند غذا بر ابعاد اجتماعی، اقتصادی، سازگاری با محیط زیست، و همچنین بر تغذیه و امنیت غذایی مورد بحث قرار دادند (Supriyanto et al. 2019). مطالعات جایگزین، تأثیر مالی، محیطی و اجتماعی اتلاف و پسماند غذا بر تغذیه و از دست دادن شغل‌ها را بررسی و تأکید کرده‌اند (Blakeney 2019). به طور کلی، روش‌های ارزیابی چرخه حیات تأثیر عوامل محیطی بر اتلاف و پسماند غذا را با در نظر گرفتن مصرف آب، گازهای گلخانه‌ای، استفاده از مواد شیمیایی، استفاده از زمین، از دست دادن تنوع زیستی و مصرف انرژی، ارزیابی می‌کنند. می‌توان مطالعاتی را برای ارزیابی تأثیر عوامل مالی بر اتلاف و پسماند مواد غذایی از محاسبات ساده ریاضی تا تحلیل‌های پیچیده تر انجام داد. براساس گزارش سازمان غذا و کشاورزی، تخمین زده شده است که از دست دادن و هدر رفت پسماند غذا در سال به طور کلی منجر به ضرر اقتصادی ۴۹۰ میلیارد دلار و اشغال ۲۳ درصد از سطح زمین کشاورزی می‌شود. علاوه بر این، از دست رفتن و هدر رفت مواد غذایی نیز مسئول انتشار ۸ درصد گازهای گلخانه‌ای و همچنین ۲۳ درصد مصرف کود در سطح جهان است (Blakeney 2019). کاربردهای نامناسب

اخیر در استفاده از منابع آب، زمین، انرژی و کود، یک ریسک جدی برای امنیت غذایی ایجاد می‌کند. امنیت غذایی برای تامین نیاز جمعیت جهانی در حال افزایش، بسیار ضروری است. این امر منجر به عدم تعادل بین تقاضا و تولید مواد غذایی می‌شود. نوسانات در تولید مواد غذایی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله شرایط اقلیمی، بلایای طبیعی و آفات است. این نوسانات نیاز به یک سیستم غذایی سازگار با محیط زیست را ایجاد می‌کند. از دست دادن مواد مغذی در سراسر زنجیره تامین مواد غذایی رایج است؛ و مدیریت پسماند میوه و سبزیجات به دلیل مشکلات بهداشتی و زیست محیطی چالش برانگیز است؛ زیرا هر گونه عدم کنترل و نظارت نامناسب مواد آلی زباله‌های غذایی می‌تواند به تغییراتی در محیط زیست منجر شود (Esparza et al. 2020).

۳-۲-۱ ویژگی‌های پسماند مواد غذایی

پسماند غذایی ماده آلی است که از منابع متنوعی (آشپزخانه‌های خانگی و تجاری، کافه‌ها، رستوران‌ها و بخش‌های فرآوری غذا) به وجود می‌آید (Kiran et al. 2014). مقدار غذایی که به طور کلی در طول زنجیره تامین و عملیات مختلف، مانند تولید، فرآوری، حمل و نگهداری هدر می‌رود، بیشتر از مقداری است که انسان‌ها واقعاً مصرف می‌کنند. در طول تمام زنجیره تامین غذا در همه مراحل، غذا دور ریخته می‌شود؛ یا از تولید اولیه تا استفاده نهایی توسط مصرف‌کنندگان به کمبود غذا منجر می‌شود. مقدار زیادی از مواد غذایی تولید شده باید قبل از تبدیل به زباله، مراحل ذخیره سازی، پردازش و مصرف را طی کنند. یک قسمت قابل توجهی از غذا می‌تواند قبل از دورریخته شدن به دو دسته تقسیم شود: بخشی که می‌توان به راحتی از هدررفت آن جلوگیری کرد (مانند اقدامات بهبود مدیریت غذا)؛ و قسمتی که هدر رفتن آن غیرقابل اجتناب است (مانند پسماندهای ناشی از پوسیدگی یا اتلاف در فرآیندهای تولید). مواد اصلی پسماند غذایی شامل سبزیجات و پوست آنها، میوه‌ها، پوسته تخم مرغ، تکه‌های گوشت، حبوبات، محصولات بوته ای، غلات، باقی مانده‌های محصولات روغنی، غذاهای دریایی و ماهی، شیر و فرآورده‌های شیر، مواد غذایی خام و ... است. بخش قابل توجهی از پسماند غذایی شامل میوه‌ها و ساقه‌های غنی از نشاسته است. با این حال، ۸۵ درصد از پسماند غذایی شامل سبزیجات است؛ اما ۱۵ درصد آن از حیوانات و محصولات مرتبط با آنها به دست می‌آید (Li and Yang 2016). پسماند غذایی به عنوان یک منبع بی‌هوده در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا بدون استفاده، به طور بی‌ارزش دور ریخته می‌شوند. پسماند غذایی سرشار از کربوهیدرات‌ها، ویتامین‌ها، چربی‌ها، فسفات‌ها، اسیدهای آمینه و عناصر کربن ضروری هستند. چندین عامل مسئول تولید پسماند غذایی هستند. به عنوان مثال، در کشورهای توسعه

یافته، پسماند غذایی توسط مصرف‌کنندگانی تولید می‌شود که مقدار قابل توجهی محصولات غذایی را خریداری کرده؛ و بدون مصرف آن‌ها را دور می‌ریزند. به‌طور مشابه، عدم وجود روش‌های مناسب برای برداشت واحدهای فرآوری و عدم اطلاعات بازاریابی مناسب در کشورهای در حال توسعه نیز موجب تولید حجم زیادی از پسماند غذایی می‌شود. اگر به جای دور انداختن غذاهای باکیفیت در سطل زباله، به نیازمندان اهدا شوند؛ و از روشهای مدیریت پسماند غذایی استفاده شوند؛ می‌توان از تولید پسماند غذایی جلوگیری کرد. اما متأسفانه ۹۵ درصد مواد غذایی به محل دفن زباله منتقل می‌شوند (Lin et al. 2013). بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی، تولید مواد غذایی تا سال ۲۰۵۰ باید به ۶۰ درصد افزایش یابد؛ تا گرسنگی جمعیت جهان برطرف شود. افزایش قیمت نفت باعث افزایش قیمت تمام شده مواد غذایی نیز می‌شود. بنابراین نیاز به روشهایی برای مدیریت پسماند مواد غذایی برای جلوگیری از مشکلات زیست محیطی و سلامت انسان ضروری است (Ma et al. 2009).

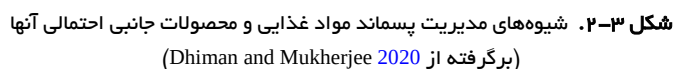
۳-۲-۲ راه‌های فعلی مدیریت زباله‌های غذایی

با افزایش جمعیت انسانی و پیشرفت اقتصاد جهانی، تولید پسماند مواد غذایی نیز با سرعت زیادی در حال افزایش است. دفع پسماندهای مواد غذایی در حال حاضر یک مسئله چالش برانگیز است. شیوه‌های متداول مدیریت پسماند غذایی شامل اجتناب از دور ریختن مواد غذایی، غذا دادن به نیازمندان، تغذیه حیوانات اهلی، سوزاندن و دفن پسماند است. اگرچه تأمین غذا برای نیازمندان به جای دور انداختن غذا در سطل زباله یکی از اهداف اصلی روش‌های مدیریت پسماند غذایی است؛ اما مقدار قابل توجهی از غذا که هدر می‌رود، غیرقابل اجتناب است. در این امر عوامل متعددی مانند: دیدگاه جامعه، شرایط بهداشتی، ارزش‌های اخلاقی و نیاز به غذای خوراکی دخیل هستند. در بسیاری از کشورها، پسماند غذایی به جای دور ریختن، به سگ‌های ولگرد و حیوانات اهلی مانند گاو و خوک داده می‌شود. با این حال، هنوز هم به دلیل قوانین بهداشتی اکثر کشورهای اروپایی، مقدار قابل توجهی به محل‌های دفن زباله منتقل می‌شوند. پسماند مواد غذایی را می‌توان به کمپوست مواد آلی شبیه به خاک تبدیل کرد؛ اما این فرآیند نسبتاً طولانی است؛ و به شرایط محیطی سازگار با محیط زیست نیاز دارد. فرآیند کمپوست اگر به درستی انجام نشود، می‌تواند عواقب مانند بوی بد ایجاد کند (Li and Yang 2016). حدود ۹۵ درصد از پسماند غذایی بدون استفاده در تولید انرژی پایدار یا روشهای دیگر، دفن یا سوزانده می‌شوند (Melikoglu et al. 2013). سوزاندن پسماند غذایی همراه با سایر پسماندهای جامد شهری یک روش سنتی است. در این روش میکروب‌ها و مقادیر شیمیایی پسماند غذایی نابود می‌شوند؛ و یک قسمت کوچکی می‌تواند به عنوان

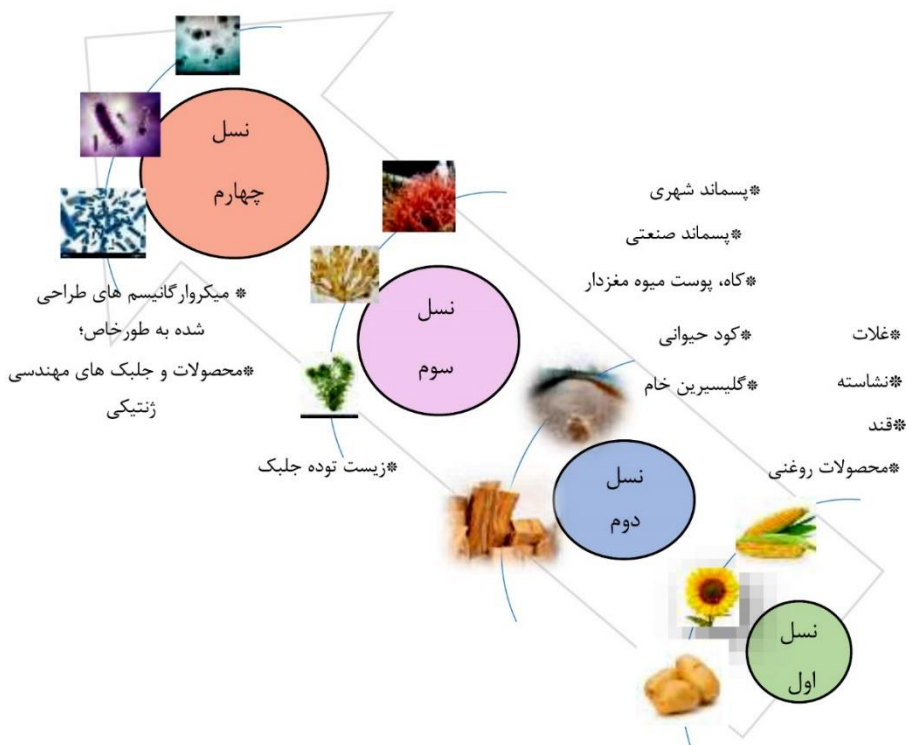
انرژی جبران شود؛ اما سوزاندن پسماند غذایی و پسماندهای جامد شهری باعث تولید CO_2 ، NO و SO_2 و سایر سموم (دی اکسین ها) می شود. برای جلوگیری از چنین مسائلی، بسیاری از کشورها گزینه دفن زباله را انتخاب می کنند؛ اما این روش دارای مزایا و معایبی است. هر دو روش سوزاندن و دفن زباله عوارض جانبی دارند. به عنوان مثال، سوزاندن انرژی تولید شده، اما مقدار زیادی گاز تولید می کند. این گاز برای محیط زیست مفید نیست. همچنین، دفن زباله کیفیت و ساختار زمین را تغییر می دهد. چندین کشور سیاست "کمتر استفاده کنید" و "کمتر هدر بدهید" را پذیرفته اند؛ تا زمین را به یک مکان مناسب تر و سالم تر برای زندگی تبدیل کنند (Karmee 2016). تولید سوخت های زیستی از پسماند غذایی در دهه گذشته به عنوان یک فناوری سبز و ایمن شناخته شده است. در این روش، به جای دور انداختن یا سوزاندن یا دفن غذا، سوخت زیستی تولید می شود. از این سوخت زیستی می توان برای اهداف متنوعی استفاده کرد (تصویر ۳-۲).

۳-۳ سوخت های زیستی به عنوان منابع انرژی پایدار

سوخت های زیستی به عنوان منابع انرژی عمل می کنند. سوخت های زیستی به شکل گرما، الکتریسیته و فرآورده تولید شده از زیست توده همراه با محصولات جانبی آن استفاده می شوند. سوخت های زیستی مواد شیمیایی پر انرژی هستند. سوخت های زیستی از میکروب های زنده و منابع زیستی پس از گذراندن یک فرآیند بیولوژیکی پیچیده با فناوری خاص تولید می شوند. در دهه گذشته، زیست توده تولید شده توسط گیاهان و میکروب ها به عنوان منبع متمایز سوخت زیستی به دلیل سازگاری با محیط زیست شناخته شده است (Heimann 2016). جلبک ها و گیاهان می توانند با استفاده از انرژی خورشیدی و دی اکسید کربن از جو، زیست توده را تشکیل داده؛ و قند را تبدیل کنند (Voloshin et al. 2015). سوخت های زیستی به عنوان منابع انرژی در کشورهای در حال توسعه ظهور کرده اند. تولید سوخت زیستی در دهه گذشته دستخوش چندین تغییر شده است. سوخت زیستی را می توان به نسل های مختلف (اول تا چهارم) طبقه بندی کرد. سوخت های زیستی نسل اول عمدتاً از ذرت، گندم، دانه های روغنی و جو تولید می شدند؛ اما بیودیزل از آفتابگردان و سویا تولید می شود (Pimentel and Patzek 2005). تخمیر نیشکر و ذرت خام همراه با میسلیم قارچ، اتانول تولید می کند. هضم کننده های نشاسته، یعنی مخمر ساکارومایسس سرویزیه و گونه قارچ رازیروپوس، آرد ذرت خام را به اتانول تبدیل می کنند (Wang et al. 2007). تولید صنعتی بزرگ، برای تولید سوخت های زیستی نسل اول، از روش تبدیل نشاسته یا ساکارز توسط آنزیم های هیدرولیز استفاده می کند (Sheldon 2018).



با این حال، سوخت‌های زیستی نسل دوم از باقی مانده‌های چوب و پسماند آلی و گیاهی مورد استفاده برای تولید بیواتانول به دست می‌آیند؛ اما سوخت‌های زیستی نسل سوم از فعالیت متابولیسی باکتری‌های سلولولیتیک همراه با ریز جلبک‌ها و همچنین سایر میکروب‌ها برای تولید بیودیزل به دست می‌آیند (Galbe and Zacchi 2002). روش فنی پسا-ژنوم^۱ به تغییرات متابولیسی ریز جلبک‌ها که منجر به پیدایش سوخت‌های زیستی نسل چهارم می‌شود، کمک کرده است (Dutta et al. 2014) (شکل ۳-۳). برای تولید نسل‌های متمایز سوخت‌های زیستی (از اول تا چهارم) از فناوری‌های مختلف استفاده می‌شود.



شکل ۳-۳. نسل های مختلف سوخت های زیستی (برگرفته از Acheampong et al. 2017)

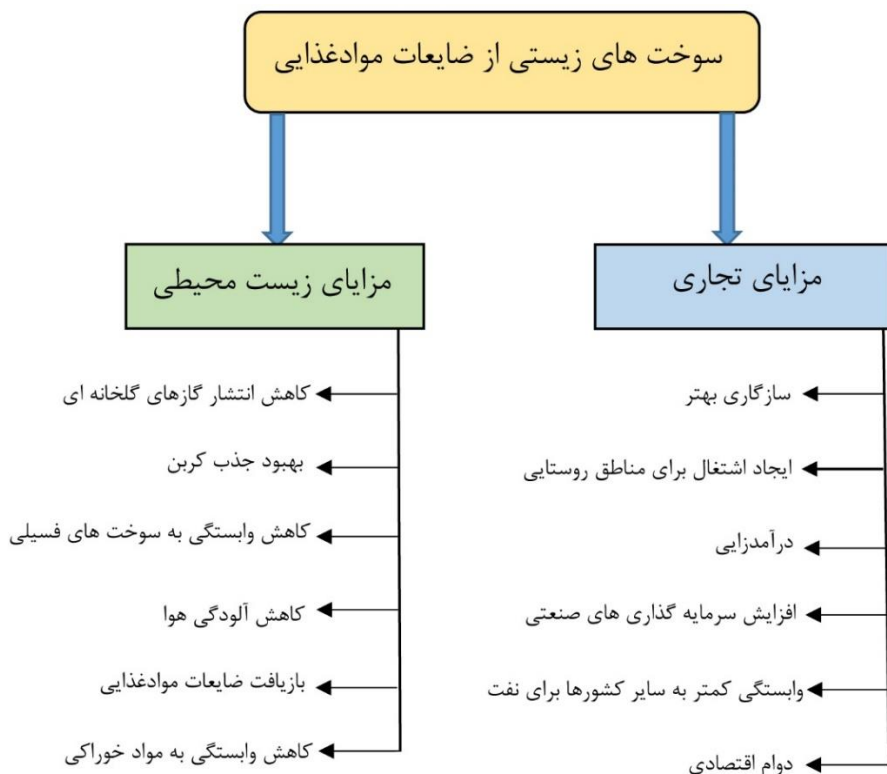
سوخت های زیستی بسته به وضعیت فیزیکی تولید، به سوخت های مایع، جامد یا گازی تقسیم بندی می شوند (Kour et al. 2019). سوخت های زیستی رایج شامل بیودیزل، بیواتانول، بیوبوتانول، هیدروژن زیستی، نفت زیستی، گاز طبیعی (گاز سنتز) و بیوزغال می باشند. استفاده متداول از سوخت های زیستی توسط انسان شامل پخت و پز، گرمایش و برق است (Isah and Ozbay 2020). تولید سوخت زیستی از زیست توده گیاهان و میکروبها به عنوان یک منبع انرژی کم هزینه و سازگار با محیط زیست در دهه گذشته شناخته شده است. سوخت زیستی می تواند تقاضای رو به رشد انرژی در سطح جهان را پوشش دهد. از آنجایی که سوخت های زیستی توسط فعالیت میکروبها تولید می شوند، وابستگی انسان به منابع انرژی های ناسازگار با محیط زیست را کاهش می دهند (Pleissner et al. 2014). مرحله مهم و ضروری در تولید سوخت های زیستی، انتخاب مواد اولیه است؛ زیرا این مواد به تولید (۸۰ تا ۹۰ درصد) کمک کرده و قیمت سوخت زیستی را نیز تعیین می کنند. افزایش پیوسته جمعیت جهانی نه تنها منجر به بحران های غذا و سوخت شده است، بلکه تهدید جدی برای

محیط زیست نیز به دنبال داشته است. به عنوان مثال: کاهش عناصر خاک، تغییر ساختار زمین و تخریب جنگل‌ها باعث بی نظمی جوی شده‌اند. بنابراین سوخت‌های زیستی تولید شده از محصولات غذایی خوراکی نسبتاً گران هستند؛ و تفاوت زیادی بین تقاضا و عرضه وجود دارد (Atabani et al. 2017). نیاز بیشتر به تامین مواد اولیه برای تولید سوخت زیستی باعث تضاد بین غذا و سوخت می‌شود. به منظور جلوگیری از این تضادها، مواد اولیه غیرخوراکی در حال حاضر برای تولید سوخت زیستی استفاده می‌شود؛ زیرا آنها ارزان تر هستند؛ و پیشرفت‌های متعددی در چند سال اخیر توسط صنعت سوخت زیستی به منظور جستجوی مواد اولیه انجام شده است.

در حال حاضر، معمولاً مواد اولیه استفاده شده شامل پسماندهای میوه و سبزیجات همراه با سایر پسماندهای غذایی و روغن‌های پخت و پز است (Mahdavi et al. 2015) (شکل ۳-۴). استفاده از پسماندهای غذایی برای تولید سوخت زیستی موضوعی است که مورد بحث قرار گرفته است؛ اما، پسماندهای غذایی مواد آلی هستند. این پسماندها به طور معمول شامل ۳۵-۶۹ درصد کربوهیدرات، ۲۲-۴ درصد روغن‌ها، پروتئین‌ها، اسیدهای آلی و چربی‌ها هستند (Kiran et al. 2014). مقادیر پروتئین و قند پسماندهای غذایی نه تنها با تخمیر قابل استفاده مجدد است، بلکه به عنوان ماده اولیه برای میکروب‌ها برای تولید محصولات مفید مانند سوخت‌های زیستی، مواد بیوشیمیایی و آنزیم‌ها نیز عمل می‌کند (Karmee 2016). تبدیل زیست توده به سوخت زیستی مشکل کمبود سوخت را حل می‌کند و مزایای زیادی را نیز ارائه می‌دهد. سوخت زیستی به عنوان یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست که می‌تواند توسط انسان‌ها و حیوانات (به عنوان تولید خوراک حیوانی) بهره‌برداری شود، عمل می‌کند (Lin et al. 2013).

در حال حاضر، بیواتانول، بیوگاز و بیودیزل فقط در مقیاس صنعتی تولید می‌شوند؛ و ۹۰ درصد از تولید سوخت‌های زیستی توسط آنها انجام می‌شود. تمام انواع سوخت‌های زیستی باید ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاصی داشته باشند؛ تا بتوانند در عملکرد موتور و حمل و نقل استفاده شوند. سوخت‌های زیستی، به ویژه سوخت‌های مایع را می‌توان به راحتی در کامیون‌ها، اتومبیل‌ها، هواپیماها و سایر وسایل نقلیه بدون هیچ مشکلی ذخیره، توزیع و استفاده شوند (Yanai et al. 2015). اما، حمل و نقل سوخت‌های زیستی در شکل گازی کمی پیچیده است؛ زیرا نیاز به پخش و چارچوب ویژه دارد. سوخت‌های زیستی مایع برای کاهش اتلاف انرژی و هزینه‌های حمل و نقل، باید در تمام محدوده‌های دما به صورت مایع باقی بمانند؛ زیرا دارای ارزش احتراق بالا هستند. سوخت‌های زیستی مایع مانند بوتانول گرمای احتراق بالایی

دارند؛ بنابراین در هواپیماها کاربرد دارند. همه سوخت‌های زیستی باید به راحتی ذخیره شوند؛ و تحمل دمای اشتعال و فشار بخار را نیز داشته باشند (Arshad et al. 2018).



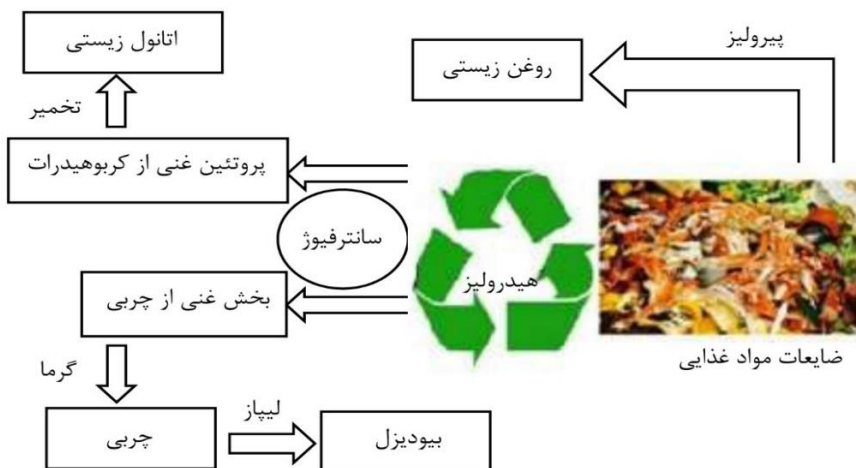
شکل ۳-۴. مزایای تولید سوخت زیستی از پسماند مواد غذایی (برگرفته از Dhiman and Mukherjee 2020)

۳-۴ تولید سوخت زیستی از پسماند میوه و سبزیجات

دفع پسماندهای میوه و سبزیجات یکی از بزرگترین چالش‌ها است؛ زیرا اکثر آنها روزانه در مکان‌های دفن زباله دفع می‌شوند. تجزیه و تفکیک بیوشیمیایی پسماندهای میوه و سبزیجات بوهای نامطبوع و گاهی محصولات جانبی نامطبوع تولید می‌کند. بسیاری از کشورهای در حال توسعه سیستم "کمتر استفاده کنید" و "کمتر هدر بدهید" را به منظور کاهش مشکلات ناشی از پسماندهای میوه و سبزیجات به کار گرفته‌اند. اگرچه دفع پسماندهای میوه و سبزیجات در مکان‌های دفن زباله یکی از روش‌های اقتصادی است؛ اما این روش سازگار با محیط زیست

نیست. به همین دلیل، نیاز به شیوه‌های بهتری در مدیریت غذا وجود دارد. متداول ترین فناوری‌هایی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: (الف) تشکیل کمپوست از پسماند میوه و سبزیجات، (ب) استفاده از پسماند میوه و سبزیجات در تهیه خوراک دام و (ج) تولید بیوگاز. این فناوری‌ها اساساً سوخت‌های زیستی گازی تولید می‌کنند. روش‌های بهره‌برداری از مواد غذایی در حال حاضر سوخت‌های زیستی مایع را از پسماند میوه‌ها و سبزیجات تولید می‌کنند (Luque and Clark 2013). روش‌های کاتالیزوری سبز، به عنوان یک ترکیب منحصر به فرد از روش فنی کاتالیزوری شیمیایی و آنزیمی، به تولید سوخت زیستی مایع جهت بهره‌برداری از پسماند میوه‌ها و سبزیجات جهت‌گیری جدیدی داده است.

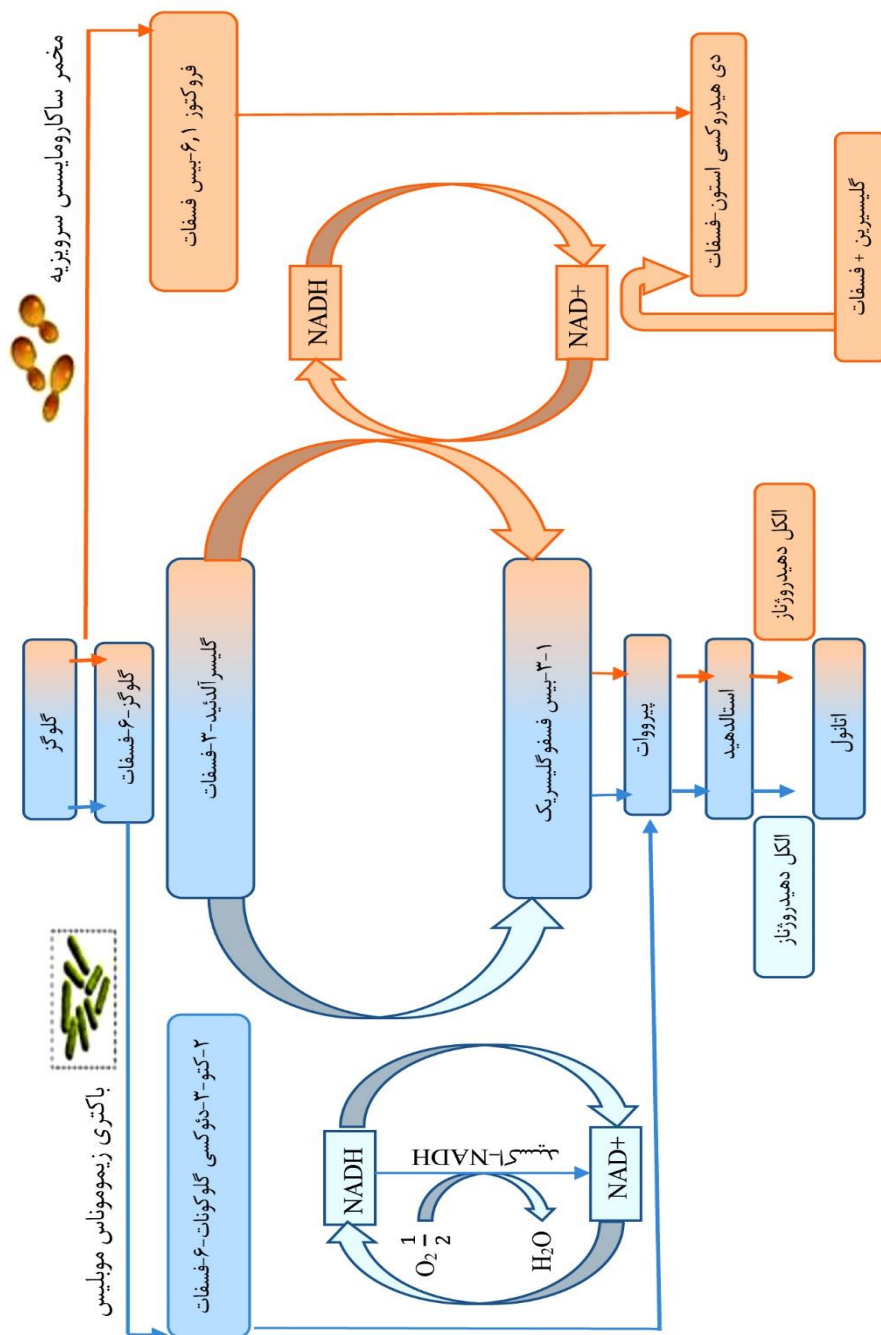
بهره‌برداری پسماند میوه‌ها و سبزیجات را می‌توان با روش چند مرحله‌ای شیمیایی کاتالیزوری، مرحله شیمیایی-آنزیم یا کاتالیز چند مرحله‌ای-آنزیم انجام داد. این واکنش‌ها امیدوارکننده هستند؛ زیرا محصولات مورد نظر را می‌توان بدون جداسازی و تصفیه محصولات واسطه به دست آورد (Karmee et al. 2010). بنابراین پژوهشگران در سراسر جهان در تلاش هستند؛ تا پسماندهای میوه و سبزیجات را به سوخت‌های زیستی مایع تبدیل کنند. به عنوان مثال: هیدرولیزهای خام کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و آمینواسیدها را می‌توان با استفاده از کاتالیز آنزیمی دوگانه استفاده شده در محصولات نانویی به دست آورد. سپس این هیدرولیزها را می‌توان با روش‌های فنی زیستی و شیمی کاتالیزوری به بیودیزل و بیواتانول تبدیل کرد. پیرولیز پسماند میوه و سبزیجات نیز می‌تواند روغن زیستی تولید کند (شکل ۳-۵) (Karmee and Lin 2014).



شکل ۳-۵. تولید روغن زیستی، اتانول زیستی و بیودیزل از پسماند مواد غذایی با روش‌های شیمیایی و بیوکاتالیزستی (برگرفته از Karmee 2016)

۳-۴-۱ بیواتانول

قبلاً، اتانول به دو روش با استفاده از تخمیر و یا فرآیندهای شیمیایی تبدیل می‌شد. به صورت شیمیایی، اتانول با واکنش اتیلن در فشار و دمای بالا تولید می‌شد. با این حال، روش شیمیایی نسبت به تخمیر سریعتر است؛ اما تخمیر مزیت‌های بیشتری دارد؛ زیرا به تجهیزات و فناوری پیشرفته نیاز کمتری دارد و محصولات غذایی و خوراکی را می‌توان در این روش استفاده کرد (Elshahed 2010). در ۱۰ سال اخیر، با این حال، بیواتانول همچنان به روش‌های سنتی تولید می‌شود. بیواتانول نسل اول از گندم و نیشکر تولید می‌شد؛ و این باعث افزایش قیمت محصولات کشاورزی و تقاضا برای خاک حاصلخیز و هزینه‌های نیروی کار شده است (Bensah and Mensah 2013). برای غلبه بر این مشکل، بیواتانول نسل دوم از محصولات کشاورزی و جنگلداری، زیست توده چوبی، محصولات انرژی زه، و سایر پسماند تولید می‌شود (Mohr and Raman 2013). استفاده از این مواد منجر به افزایش تولید دی اکسیدکربن شد. آماده سازی‌های آنزیمی و فیزیکوشیمیایی باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی می‌شد (Robak and Balcerek 2018). به منظور پیشگیری از این مشکلات، پژوهشگران با آغاز کار بر روی تولید اتانول زیستی از جلبک‌ها، تلاش کردند. اتانول به عنوان یک منبع تجدید پذیر انرژی می‌تواند از محصولات کشاورزی و دامداری و تخمیر قند توسط میکروب‌ها تولید شود؛ اما هنوز هم، روش‌های سازگار با محیط زیست برای تولید اتانول برای جلوگیری از مسائل زیست محیطی مورد نیاز است (Thatoi et al. 2014). باکتری‌ها و جلبک‌های آبی می‌توانند به عنوان منابع جایگزین بیواتانول عمل کنند؛ زیرا دارای سرعت رشد سریع و مقادیر لیگنین کم یا بسیار کم، بازدهی بالا می‌باشند؛ و تولید این ارگانیسم‌ها نیازی به زمین کشاورزی ندارند (Greetham et al. 2018). به هر حال، مخمر و جلبک‌ها قابلیت تولید اتانول را از طریق شکستن قند و هیدرولیز دارند؛ اما تعداد کمی از باکتری‌های موجود در دریا نیز با همین خاصیت کشف شده‌اند. برای چندین دهه، باکتری *زیموموناس موبلیس* و مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* برای تولید اتانول صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Yang et al. 2016; Leksawasdi et al. 2001). مشخص شده است که مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* نسبت به باکتری *زیموموناس موبلیس* در تولید زیست توده بهتر عمل می‌کند؛ اما باکتری *زیموموناس موبلیس* دارای مزایایی شامل جذب بیشتر پیش نیازها، تحمل اتانول بالا، زمان تولید کوتاه، مقرون به صرفه بودن، تولید بیشتر و نیازهای نگهداری کمتر را می‌باشد (Kim and Dale 2004) (شکل ۳-۶). سارکار و همکاران (2019) یک باکتری آبی جدید کشف کردند که با استفاده از پیش نیازهای مناسب می‌تواند اتانول تولید کند.



شکل ۳-۶. مسیر متابولیک تولید بیواتانول توسط باکتری زیموموناس موبلیس و مخمر ساکارومایسس سرویزیه (برگرفته از Yukesh Kannah et al. 2020)

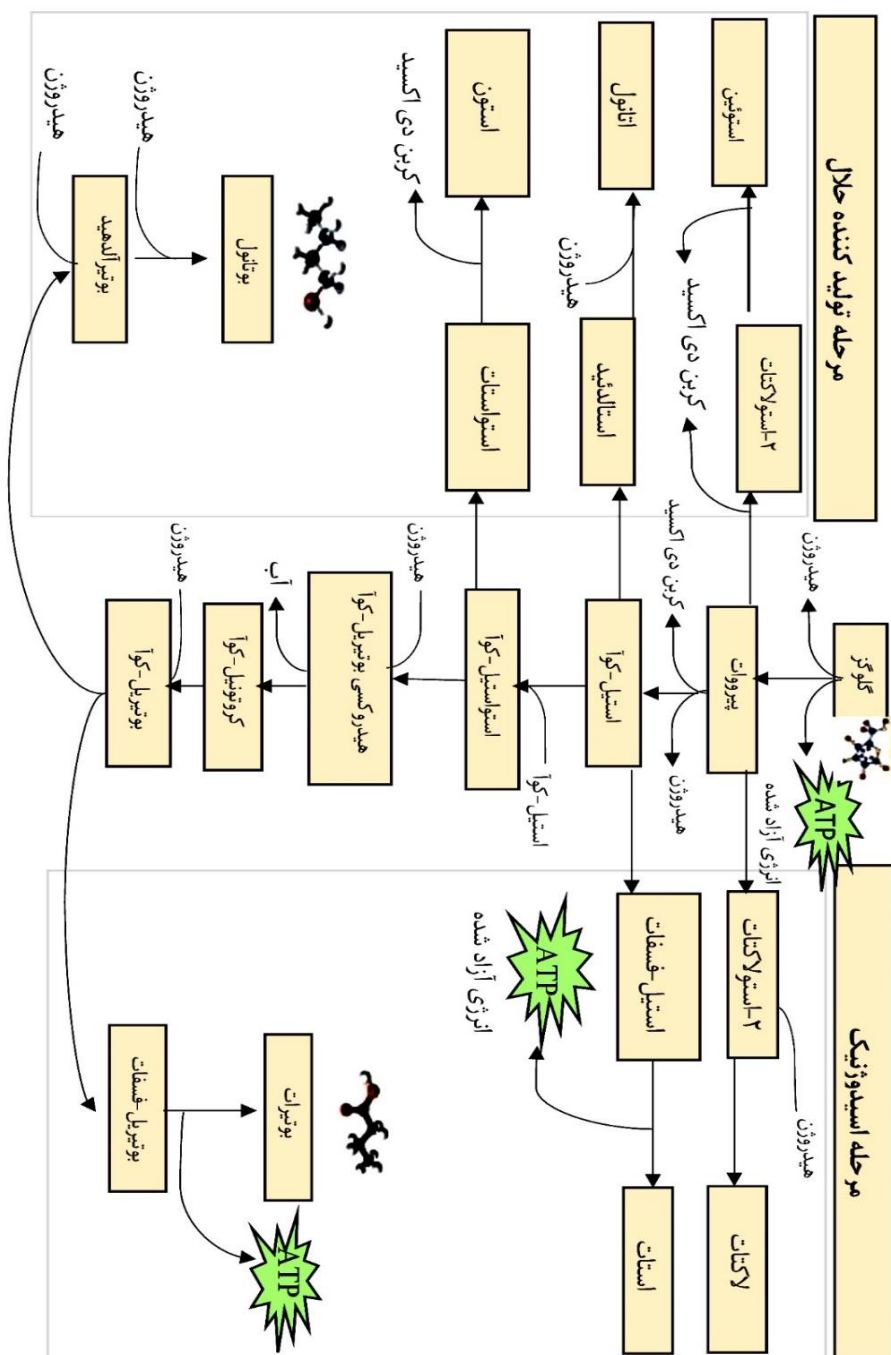
بیواتانول سوخت زیستی غالب در بازار است؛ زیرا می‌تواند با بنزین مخلوط شود؛ و در مقایسه با سایر سوخت‌های زیستی دارای مقادیر اکسیژن بالا (۳۵ درصد) است. مقادیر بالای اکسیژن باعث احتراق بهتر هیدروکربن‌ها، کاهش مونوکسیدکربن و کاهش سایر انتشارات خطرناک هیدروکربنی می‌شود (Gebregergs et al. 2016). بیواتانول بی خطر است؛ زیرا اثرات جانبی کمی بر محیط زیست دارد؛ از طریق تخمیر قند توسط فعالیت میکروبی تولید می‌شود؛ و می‌تواند به عنوان جایگزین بنزین استفاده شود (مخلوط بیواتانول و بنزین دارای عدد اکتان بالاتری است) (Owen 1991). بیواتانول با وجود معایبی مانند: فشار بخار کمتر، چگالی انرژی کمتر و ماهیت خورنده، به دلیل ویژگی‌های مثبت فراوان، به عنوان یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست مورد توجه قرار می‌گیرد (Bhuvaneswari and Sivakumar 2020). تولید جهانی بیواتانول در ۱۰ سال گذشته افزایش چشمگیری را نشان داده است. بخش عمده ای از بیواتانول در ایالات متحده و برزیل تولید می‌شود.

محصولات ذرت و نیشکر به عنوان پیش نیازهای اصلی در تولید بیواتانول در مقیاس بزرگ عمل می‌کنند. تولید بیواتانول باعث گران شدن محصولات ذرت و نیشکر می‌شوند (Canilha et al. 2012). اخیراً، پسماندهای آشپزخانه، پسماندهای غذایی، باقیمانده‌های نانوایی و پوست موز و سیب زمینی برای تولید بیواتانول استفاده شده‌اند (Sulaiman et al. 2014). قبل از مرحله هیدرولیز آنزیمی، پیش‌پردازش پسماندهای غذایی یا پسماندهای میوه و سبزیجات ضروری است؛ و به طور کلی این پسماندها با استفاده از اتوکلاو آماده می‌شوند؛ تا از آلودگی به وسیله فعالیت میکروبی جلوگیری شود. از تخریب مواد غذایی یا پسماند میوه و سبزیجات با فرآیند آماده سازی حرارتی جلوگیری می‌شود. پسماندهای مواد غذایی یا پسماند میوه و سبزیجات پس از مرحله آماده سازی، تحت فرآیند ساکاریزه شدن یا هیدرولیز قرار می‌گیرند (Wong and Sanggari 2014). هیدرولیز نشاسته با استفاده از ترکیبی از آنزیم‌ها، یعنی گلوکوآمیلاز و آمیلازهای آلفا و بتا، انجام می‌شود. این آنزیم‌ها پسماندهای غذایی یا پسماندهای میوه و سبزیجات را هیدرولیز می‌کنند. سپس مواد هیدرولیز شده، مراحل تخمیر را طی می‌کند؛ و پس از تقطیر (مرحله نهایی)، بیواتانول خالص به دست می‌آید. مخمر ساکارومایسس سرویزیه سویه H058 مواد هیدرولیز شده از پسماندهای میوه و سبزیجات به اتانول تبدیل می‌کند؛ اما مخمر ساکارومایسس سرویزیه سویه K35 تبدیل پسماندهای خمیرمایه فوری به بیواتانول را از طریق شکستن قند و تخمیر انجام می‌دهد (Yan et al. 2013; Yang et al. 2014). پوست سیب زمینی دارای مقدار زیادی کربوهیدرات است؛ اما هیدرولیز آن با استفاده از اسید و آنزیم‌ها، و بعد از آن، تخمیر آن توسط مخمر

ساکارومایسس سرویزیه گونه بایانوس، منجر به بازده بالایی از بیواتانول می‌شود. پسماند غذایی کره جنوبی حاوی حدود ۶۵ درصد کربوهیدرات است؛ و هیدرولیز آن با آنزیم‌ها و تخمیر توسط مخمر ساکارومایسس سرویزیه باعث بازده مناسبی از اتانول شده است. از پسماند موز نیز می‌توان برای تولید اتانول استفاده کرد (Snehal and Gaurav 2017). بلو و همکاران (2014) از طریق فرآیند استفاده از یک غشا توخالی قابل نفوذ، برای تولید اتانول از پسماند موز استفاده کردند. پسماند مواد غذایی خانگی هنگامی که در معرض فرآیند ساکاریزه شدن و مایع سازی قرار می‌گیرند، منجر به تولید اتانول بالا می‌شود. محققان در سراسر جهان ادعا کرده‌اند که زباله‌های گیاهی سرشار از زیست توده کربوهیدرات هستند؛ و می‌توانند به عنوان پیش نیاز مناسب برای تولید انرژی سازگار با محیط زیست عمل کنند (Matsakas et al. 2014). تولید سوخت زیستی از پسماند میوه و سبزیجات در بسیاری از کشورهای در حال توسعه مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعه سلیمان و همکاران (2014)، بیودیزل، بیواتانول و سایر محصولات جانبی ارزشمند را از یک پالایشگاه زیستی با رعایت اصول و قوانین اسلامی در مالزی تولید کردند. پسماند گیاهی می‌توانند به اشکال مختلف مانند: خام، پخته، خوراکی یا غیرخوراکی منشأ گرفته و در طی فرآیندهای تولید، برداشت و ذخیره سازی تولید شوند. اکثر پسماند گیاهی وارد محل‌های دفن زباله می‌شوند؛ بنابراین بوی نامطبوع، متان و شیرابه مضر تولید می‌کنند (Graf and Koehler 2000). پسماند گیاهی، سرشار از لیگنوسلولز است. پسماند گیاهی پس از هضم میکروبی می‌تواند بیواتانول تولید کند. در مطالعه پرومون (2015)، پیشنهاد شده است که پسماندهای سبزیجات به دلیل داشتن لیگنوسلولز، قابل تجزیه به گلوکز و گزیلوز هستند. پسماند گیاهی سرشار از کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آمینه، فسفات‌ها و چربی‌ها هستند و می‌توان از این اجزا برای تولید بیواتانول استفاده کرد (Koppram et al. 2014). لیگنوسلولز از سلولز، همی سلولز و لیگنین تشکیل شده است؛ اما زباله‌های گیاهی از سلولز و اجزای همی سلولز موجود در لیگنوسلولز تشکیل می‌شوند. این ترکیبات می‌توانند به قند هیدرولیز شوند. قند به عنوان پیش نیاز مناسب برای میکروب‌ها (باکتری‌ها، مخمر قارچ‌ها) برای تولید اتانول با تخمیر عمل می‌کند (Bhadana and Chauhan 2016) (شکل ۳-۷).

۳-۴-۱ تجزیه پسماند میوه توسط باکتری آبزی سویه سیتروباکتر گونه E4

سارکار و همکاران (2019) از پسماند آشپزخانه، میوه، باغچه و کاغذ به عنوان پیش نیاز برای تولید بیواتانول استفاده کردند. آنها این پسماند را جمع‌آوری کردند؛ و به تکه‌های کوچک خرد کردند؛ و سپس به مدت ۲ روز خشک کردند.



شکل ۳-۷. مسیر متابولیک تبدیل گلوکز به بیواتانول (برگرفته از Yakesh Kannah et al. 2020)

پس از ۲ روز، پسماند به صورت پودر ریز آسیاب شده؛ و مقادیر قند و پروتئین آنها تعیین شد (Chang and Zhang 2017). ده سویه باکتریایی آبی (E1-E10) (مقاوم در برابر اتانول) برای استفاده از پیش نیاز و کارایی تخمیر مورد آزمایش قرار گرفتند. حضور فرآیند تخمیر با تشکیل حباب‌ها در لوله‌ی دورهام تشخیص داده شد. آنها گزارش داده‌اند که تمام سویه‌های باکتری آبی پسماند میوه و آشپزخانه را نسبت به پسماند کاغذی ترجیح می‌دهند. همچنین، پسماند باغچه فعالیت تخمیری بیشتری نشان داد. سویه E3 و سپس E8 بیشترین اندازه حباب در لوله دورهام را با تخمیر پسماند باغی نشان داد. بسیاری از سویه‌های باکتریایی انتخاب شده فعالیت تشکیل حباب مثبت را با تفاوت‌های جزئی در انتخاب پیش نیاز نشان دادند. برای مثال: سویه E2 با تخمیر پسماند میوه حباب‌های بزرگتری ایجاد می‌کنند؛ در حالی که سویه‌های E1، E2 و E4 پسماند آشپزخانه را ترجیح می‌دهند. سویه E9 زمان کوتاهی برای تشکیل حباب با تخمیر پسماند میوه داشت؛ اما سویه‌های E1 و E8 زمان کوتاهی برای تخمیر پسماند آشپزخانه داشتند. سویه‌های باکتریایی قابلیت استفاده موثر از قند از نمونه‌های زباله را دارند؛ زیرا سویه‌های باکتری آبی دارای آنزیم سلولاز هستند (Shanmugapriya et al. 2012). سویه E8 به نظر می‌رسد بیشترین مقاومت به اتانول را داشته باشد؛ اما سویه E6 کمترین مقاومت را نشان داده است. E3 تخمیر پسماند میوه را ترجیح می‌دهد؛ و به نظر می‌رسد بهترین سویه برای تولید اتانول با تخمیر موثر باشد. سویه‌های مقاوم به اتانول برای تولید اتانول مناسب نیستند. باکتری‌های اسید لاکتیک و اسید استیک به اتانول مقاوم هستند؛ بنابراین برای تولید اتانول مناسب نیستند (Bartowsky and Henschke 2008). این میکروب‌ها بیشتر از اتانول برای تولید اسید استیک استفاده می‌کنند. به عنوان نمونه، باکتری *زیموموناس موبلیس* (مقاوم به اتانول) تنها می‌تواند ساکارز را به اتانول تخمیر کنند؛ اما نمی‌تواند سایر پیش نیازهای کربوهیدراتی را تخمیر کنند. سویه E4 بازده بالاتری از اتانول در تخمیر پسماند میوه داد که توسط تجزیه و تحلیل کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا تأیید شد.

۳-۴-۱-۲ از پوست و پسماند مرکبات

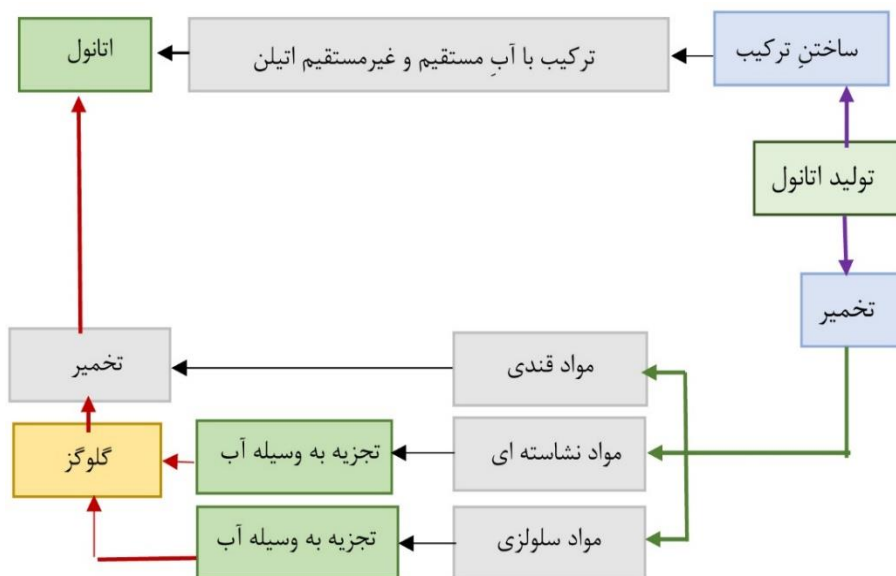
بسیاری از محققان قابلیت مرکبات در تولید اتانول را مطالعه کرده‌اند. ویدمر و همکاران (2010) نتیجه آماده سازی تولید اتانول از پوست پرتقال را با هیدرولیز قند و به دنبال آن تخمیر بررسی کردند؛ و بازده قابل توجهی از اتانول یافتند (Martín et al. 2010). ژو و همکاران (2008) روش تولید اتانول از پسماند پوست مرکبات را با استخراج دی-لیمون (ماده اصلی تشکیل‌دهنده رایحه مرکبات) بررسی کردند. این روش شامل چهار مرحله است. ابتدا دی-لیمون با آماده‌سازی حذف و استخراج می‌شود. سپس با استفاده از ساکاره سازی و تخمیر

همزمان، اتانول تولید می‌شود. در مرحله بعد، اتانول با استفاده از تقطیر حذف می‌شود. در نهایت، مواد باقیمانده در خوراک دام و محصولات جانبی استفاده می‌شوند. مشخص شد که تخمیر پسماند مرکبات، اتانول و دی‌لیمون تولید می‌کند. مرکبات مانند موز در دسته پرفروش‌ترین محصولات در سراسر جهان قرار دارد (Marín et al. 2007) به دلیل شرایط ذخیره‌سازی، حمل و نقل و فروش ضعیف، بیشتر میوه‌ها بدون مصرف به زباله تبدیل می‌شوند. پسماند آب پرتقال، یعنی گوشت پرتقال، پوست پرتقال، الیاف و بافت‌ها، حاوی مقادیر زیادی از قندها، سلولز، همی‌سلولز، پکتین و پروتئین‌ها هستند (Dahmoune et al. 2013). اگر این پسماند در مخازن ریخته شوند، باعث مسدود شدن آنها می‌شوند، اما دفن آنها در محل دفن پسماند منجر به آلودگی زیست محیطی می‌شود؛ اما به دلیل غنی بودن آنها از قندها، این پسماند مناسب برای تولید بیواتانول هستند (Cypriano et al. 2018). پسماند میوه لیمو (لیموشیرین) و پرتقال (پرتقال شیرین) سرشار از گلوکز با مقدار کمی لیگنین هستند؛ بنابراین در مقایسه با میوه‌های غنی از لیگنین برای تولید بیواتانول مناسب‌تر هستند (Girish et al. 2014). پوست مرکبات و میوه‌های باقی مانده، مواد خام مناسب برای تولید بیواتانول (نسل دوم) هستند. سویه مخمر *پاراپسیلوز کاندیدا* NRRL Y-12969 همراه با سایر سویه‌های مخمر، تخمیر پسماند مرکبات را به خوبی انجام می‌دهند؛ زیرا این سویه می‌تواند پنتوزهای موجود در پسماند مرکبات را تخمیر کند؛ و در نتیجه بازده اتانول را افزایش می‌دهد (Umamaheswari et al. 2010; Swain and Krishnan 2015). پسماند مرکبات و پوست مرکبات جمع‌آوری، شسته، و در آفتاب یا کوره خشک می‌شوند. سپس پسماند خشک شده آسیاب می‌شوند؛ و به آنها آب مقطر اضافه می‌شود. در ادامه، این ماده اولیه قبل از اختلاط با آنزیم‌ها (سلولازها، همی‌سلولازها و پکتین) استریل و سرد می‌شود؛ تا هیدرولیز شود. مواد هیدرولیز شده توسط کشت تک‌مخمر یا با کشت مشترک مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* و قارچ *پاراپسیلوز کاندیدا*^۱، در شرایط هوازی و بی‌هوازی تخمیر می‌شوند. این فرآیند باعث تولید بیواتانول می‌شود و پس از آن، با تقطیر این فرآیند تکمیل می‌شود (Girish et al. 2014). مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری جهان به دلیل شرایط مناسب خاک، آب و اقلیم، بزرگترین تولیدکنندگان مرکبات هستند. در این مناطق، پرتقال، لیمو ترش، لیموشیرین، نارنگی و آناناس تلخ از جمله مرکباتی هستند که ارزش تجاری بالایی دارند (Hayat et al. 2010). صنایع فرآوری مرکبات مسئولیت تولید آبمیوه و روغن‌های اساسی را برعهده دارند (De Castro 2014). بیشترین بخش از پرتقال به عنوان یک محصول جانبی مفید استفاده می‌شود؛ و بخش باقی‌مانده شامل دانه‌ها، پوست و الیاف به مواد زائد تبدیل می‌شود

(Oberoi et al. 2010). پسماند مرکبات عمدتاً شامل گوشت و پوست میوه است. این پسماند از صنایع آبمیوه و میوه‌های دور انداخته شده به دست می‌آید؛ و شرایط ورود به زنجیره غذایی را ندارد. بخش عمده پسماند مرکبات از پوست مرکبات تشکیل شده و پوست مرکبات برای تولید محصولات با ارزش مانند فلاونوئیدها و اسیدهای فنولیک استفاده می‌شود (Ruiz and Flotats 2014). پسماند مرکبات ۳۰ درصد از کل مرکبات را تشکیل می‌دهند؛ و برای تولید سوخت زیستی مناسب هستند. تخمیر زیستی سبزیجات، میوه‌ها و هیدراتاسیون اتیلن با کاتالیز باعث تولید اتانول می‌شود. برای تولید اتانول از طریق تخمیر مواد اولیه مورد نیاز شامل نشاسته (سیب زمینی، ذرت) یا قندها (چغندر قند، میوه‌ها) یا مواد سلولزی (چوب یا باقی مانده‌های کشاورزی) است (Choi et al. 2013). قندها می‌توانند به طور مستقیم به اتانول تبدیل شوند؛ اما نشاسته‌ها قبل از تخمیر ابتدا هیدرولیز می‌شوند. اسیدهای معدنی سلولز را به قند تبدیل می‌کنند. پسماند مرکبات از فروکتوز، گلوکز، ساکارز، سلولز، پکتین، همی سلولز، لیگنین، لیمون و پروتئین تشکیل شده است (Balasubramanian et al. 2011). چوب و همکاران (2015) روشی را برای تخمیر پسماند پوست مرکبات همراه با سایر پسماند میوه مانند تفاله سیب و پوست موز برای تولید بیواتانول توسط مخمر توصیف کردند؛ و بازده بیواتانول بالایی را یافتند. آماده سازی پسماند پوست نارنگی پاکستانی (نارنگی) با کاهش مقادیر دی-لیمون، کارایی عملکرد و بازده اتانول بالاتری را نشان داد (Hayashida et al. 1982). پوربافرانی و همکاران (2010) از یک فرآیند تلفیقی برای تولید اتانول، لیمون، بیوگاز و پکتین استفاده کردند. در این فرآیند پسماند مرکبات را با عملیات اسیدی و سپس تخمیر قند توسط مخمر نانوائی هیدرولیز کردند. هضم بی هوازی پسماند هیدرولیز شده مرکبات بیوگاز تولید می‌کند (Taherzadeh and Karimi 2007). دو پالایشگاه زیستی پسماند مرکبات وجود دارد که به دلیل تولید اتانول شناخته شده‌اند. پالایشگاه بزرگتر اتانول، لیمون و بیومتان تولید می‌کند؛ اما پالایشگاه کوچکتر لیمون، مواد حاصل از هاضم و بیومتان تولید می‌کند (Lohrasbi et al. 2010). در روش فنی تصفیه اسید، پسماند مرکبات با مقادیر ثابت اسید سولفوریک و آب مخلوط می‌شوند. بعد از آن، این مخلوط برای هیدرولیز به راکتور هیدرولیز منتقل می‌شود. در راکتور هیدرولیز، تبخیر لیمون انجام می‌شود.

ماده هیدرولیز شده تصفیه می‌شود؛ تا از مواد جامد جدا شود (Jain and Chaurasia 2014). مقادیر قندی به ظرف تخمیر اضافه می‌شود؛ تا تخمیر اتانولی را آغاز کند. در این فرآیند، میکروب‌ها، قندها را به اتانول تبدیل می‌کنند؛ و محلول حاوی اتانول و آب، به عنوان "آبجو" شناخته می‌شود. سپس، با استفاده از فرآیند تقطیر، اتانول از آب جدا می‌شود؛ و در مرحله

استخراج اتانول، اتانول خالص به دست می‌آید (Devi et al. 2016). پسماند جامد حاصل از فیلتراسیون و باقی مانده‌های واحدهای تقطیر برای تولید متان به هاضم بی‌هوازی منتقل می‌شوند. مقدار کمی متان در دیگ بخار در طول تولید بخار از بین می‌رود. از این متان در راکتور هیدرولیز و ستون تقطیر استفاده می‌شود (شکل ۳-۸). پس از استخراج آب از مرکبات، پسماند مرکبات باقی مانده سرشار از لیگنوسلولز است. این پسماند مرکبات باقی مانده می‌تواند برای تولید بیواتانول تخمیر شود (Will et al. 2000). قارچ *آسپرژیلوس نیچر* و مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* با استفاده از تخمیر و قندسازی پسماند مرکبات، پوست آناناس و پوست موز، بیواتانول تولید می‌کنند (Wu et al. 2015). خداکر و همکاران (2020) دریافتند که شرایط pH و دما بهینه بر کارایی تخمیر پوست موز تأثیر می‌گذارد. مقادیر گلوکز بیشتر در پوست پرتقال و آناناس منجر به بازده اتانول بالا می‌شود. مقدار بیشتری از پوست فاسد میوه‌ها و سبزیجات در جهان تولید می‌شود. دفع پوست فاسد میوه‌ها و سبزیجات در محیط، علاوه بر تأثیر بر حفظ تعادل محیط زیست، بر زنجیره غذایی نیز تأثیر می‌گذارد (Itelima et al. 2013). تولید بیواتانول از پسماند میوه‌ها و سبزیجات، نه تنها فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهد، بلکه خاک را با مقادیر هوموس غنی می‌کند (Khandaker et al. 2018).



شکل ۳-۸. روش‌های تولید اتانول (برگرفته از Taghizadeh-Alisaraei et al. 2017a)

۳-۴-۳ از پسماند آناناس

می‌توان پسماند آناناس را بازیافت کرد؛ و از آن‌ها برای تولید محصولات مفید در صنایع جایگزین و خوراک دام استفاده کرد. به عنوان مثال، می‌توان از پسماند آناناس برای تولید بیواتانول استفاده کرد (Prasad et al. 2007). پسماند آناناس منبع غنی قندها (گلوکز، فروکتوز و ساکارز) و سایر مواد مغذی ضروری است (Hossain et al. 2008). تبدیل پسماند آناناس به محصولات با ارزش مانند بیواتانول، باعث کاهش آلودگی محیط زیست و حمایت از فرآیند بازیافت می‌شود. حسین و فضلی (2010) درصد کل بیواتانول تولید شده از پسماند آناناس را پس از تخمیر مخمر (ساکارومایسس سرویزیه) بررسی کردند. آنها از آناناس‌های فاسد شده استفاده کردند؛ و آن‌ها را در pH مختلف پردازش کردند. آن‌ها متوجه شدند که محدوده‌های pH پایین‌تر ($pH=4$) منجر به بازده بیشتری در تولید بیواتانول می‌شود. مقادیر pH بالاتر ($pH=6$) باعث کاهش تولید بیواتانول می‌شود. در صورت استفاده از باقیمانده‌های آب آناناس به عنوان پیش نیاز، تولید اتانول بیشتر در مقادیر pH پایین‌تر تولید می‌شود؛ اما هیچ تأثیر قابل توجهی از pH (۳ تا ۶) در صورت استفاده از پساب آناناس به عنوان پیش نیاز مشاهده نشد (Muttamara et al. 1994). وقتی پساب کارخانه آناناس به عنوان پیش نیاز استفاده شود، نشان داد که در محدوده‌های pH پایین‌تر، بازده قابل توجهی از نظر اتانول تولید می‌شود (Prior and Potgieter 1981). تغییرات قابل توجهی در کل جامدات محلول نیز قبل و بعد از فرآیند تخمیر، مانند محدوده pH مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، در pH پایین‌تر (۴)، کل جامد محلول کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت مخمر در فرآیند تخمیر، بازده بیواتانول افزایش می‌یابد. قبل از تخمیر، مقادیر کل جامدات محلول بالا بودند؛ اما پس از تخمیر، این مقادیر کاهش می‌یابند. پسماند آناناس فاسد شده در هنگام تخمیر با مخمر (ساکارومایسس سرویزیه)، حداکثر بازده اتانول را در دمای ۳۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهند. این فرآیند با کاهش دما کاهش می‌یابد؛ و نشان می‌دهد که ۳۰ درجه سلسیوس محدوده دمای بهینه برای عملکرد موثر ساکارومایسس سرویزیه است (Mohd Azhar et al. 2017). نتایج مشابه توسط ویلیامز (2009) گزارش شده است که در آن با استفاده از محدوده‌های pH پایین‌تر از آب آناناس، بازدهی بیشتری در دماهای ۳۰ درجه سلسیوس و ۲۷ درجه سلسیوس حاصل شد. در دماهای پایین‌تر، فعالیت متابولیکی تخمیر کاهش می‌یابد. این کاهش فعالیت منجر به کاهش استفاده از ماده غذایی و کاهش نرخ انتشار محصول در محیط تخمیر می‌شود. در نتیجه، بازدهی تولید اتانول تحت تأثیر قرار می‌گیرد. گیل و همکاران (2018) پسماند پوست و هسته آناناس شیرین برای تولید اتانول را آزمایش کردند. آنها ابتدا با استفاده از برش دادن، پوست و هسته آناناس را جدا کردند. سپس پسماند حاصل را به صورت جامد بررسی کردند؛ و متوجه شدند که مقدار

کافی قند و آنزیم‌های پروتئولیتیک برای تخمیر موثر در آن وجود دارد. فشار دادن پسماند جامد می‌تواند منجر به تولید مایعی با حدود ۶۰ درصد مقادیر الکل شود. مطالعات انجام شده بر روی تعیین شرایط بهینه برای فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر پسماند مختلف آناناس نشان می‌دهد که با افزایش دما، عملکرد قندهای قابل تخمیر نیز افزایش می‌یابد (Roda et al. 2016). به طور مشابه، کاهش کل جامدات محلول با pH بالا مشاهده شده و نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر متوالی را می‌توان در ۶ pH و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام داد. عملیات حرارتی یک مرحله ضروری قبل از انجام تخمیر است؛ زیرا اگر محیط در ساعات اولیه تخمیر استریل نشود، باکتری‌های اسیدی می‌توانند رشد کنند. مخمر *ساکارومیسس بایانوس* CECT 1926 به نظر می‌رسد که سویه مناسبی برای هر دو فرایند (ساکارزی کردن و تخمیر) و فرایندهای (ساکارزی کردن و تخمیر متوالی) باشد؛ زیرا با حفظ واحدهای کلونی تشکیل‌دهنده نسبتاً بالا، قادر است در دماهای بالاتر (۴۰ درجه سلسیوس) و محدوده pH بالا (۶ pH) به طور موثر عمل کند. کاهش کل جامدات محلول همچنین رشد میکروب‌ها را به دلیل کاهش مواد مغذی کند می‌کند. با این حال، در مرحله فرآیند ساکارزی کردن از فرآیند تخمیر و فرآیند ساکارزی کردن متوالی، کل جامد محلول با شروع تخمیر بدون تأثیر بر عملکرد اتانول افزایش می‌یابد (Demirbas 2008). در مقایسه با تخمیر مستقیم، ساکارزی کردن و تخمیر متوالی رشد میکروبی سریع‌تری را با تخلیه سریع کل جامدات محلول در ۲۴ ساعت اول شروع تخمیر نشان می‌دهد. این امر ممکن است، به دلیل غلظت بالای قندها در محیط باشد. غلظت بالای قندها باعث کاهش فعالیت مخمر *ساکارومیسس سرویزیه* در حضور مقدار زیادی پیش نیاز می‌شود. در فرایند همزمان ساکارزی کردن و تخمیر، همبستگی مشابهی بین کل جامدات محلول و واحدهای تشکیل کلونی مشاهده شده است. این امر منجر به تولید بالای اتانول می‌شود. پیشنهاد شده است که فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان باعث افزایش بازده اتانول با تبدیل سریع قند به اتانول توسط هیدرولیز می‌شود که فعالیت مخمر را به دلیل فراوانی گلوکز مهار می‌کند (Sánchez and Cardona 2008). هر دو فرآیند تخمیر و ساکاریزه شدن، بسته به گونه میکروب، باعث کاهش pH محیط می‌شوند. در مقایسه با فرآیند تخمیر مستقیم، ساکارزی کردن و تخمیر متوالی بازدهی بهتری در تولید اتانول ندارد؛ در حالی که ساکاریزه کردن و تخمیر همزمان در بازدهی متوالی افزایش نشان می‌دهد. در تخمیر مستقیم، به طور کلی تمام قندهای قابل تخمیر در حین ساکارزی کردن مصرف می‌شوند؛ و در انتهای این مرحله تنها کسر کوچکی از قندها به عنوان باقیمانده حاصل از فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک در محیط باقی می‌ماند. تقاضای انرژی جهانی برای نسل دوم بیواتانول از طریق

پسماند به طور پیوسته در حال افزایش است. در دهه گذشته، پسماند آناناس، به ویژه پوست و شاخه‌ها، به عنوان مواد خام برای تولید بیواتانول استفاده شده‌اند (Cardoso et al. 2013). آغاز تخمیر و افزایش مقادیر قند در پسماند آناناس توسط گونه‌های مخمر با هیدرولیز آنزیمی و آماده‌سازی اسیدی انجام می‌شود. مراحل کلیدی تولید بیواتانول شامل هیدرولیز، تخمیر، تقطیر و در نهایت آبیگری هستند. مقادیر قند بالای پسماند آناناس منجر به افزایش بازده بیواتانول می‌شود (Hossain and Fazlly 2010). قبل از تولید اتانول، پسماند آناناس جمع آوری، شسته، خرد شده و به مدت ۲ روز در آون خشک می‌شود. بعد از آن آنها را به پودر تبدیل کرده؛ و در نهایت با آب مقطر مخلوط می‌کنند. آماده‌سازی اسیدی (معمولاً با استفاده از اسید سولفوریک) در این مخلوط قبل از اتوکلاو انجام می‌شود (Del Campo et al. 2006). بعد از سرد شدن مخلوط اتوکلاو شده، آنزیم‌هایی (همی سلولازها، پکتیناز و سلولازها) برای تشکیل هیدرولیز به آن اضافه می‌شوند. در فرآیند هیدرولیز، مواد را به قند تبدیل می‌کنند؛ و سپس در مرحله تخمیر، مخمر به محلول قند اضافه می‌شود. در ادامه، کل مواد با اختلاط مناسب تحت تخمیر هوازی قرار می‌گیرد. در پایان تخمیر، محصول نهایی تقطیر و آبیگری می‌شود؛ تا اتانول جمع آوری شود (Conesa et al. 2018).

۳-۴-۱-۴ از پسماند موز و انبه

موز یکی از مهم‌ترین محصولات میوه‌ای است. این محصول در سرتاسر جهان رشد می‌کند. کشت عمده موز در آسیا و آمریکا و سپس در استرالیا است. بخش قابل توجهی از موز در طول برداشت و حمل و نقل هدر، فاسد و یا دور ریخته می‌شود (Reddy and Reddy 2005). این موزهای مصرف نشده یا فاسد شده وارد محل دفن زباله شده و باعث آلودگی محیط زیست می‌شود. با این حال، پسماند موز را می‌توان در تولید اتانول زیستی نسل دوم استفاده کرد؛ زیرا سرشار از قندهای ضروری و مواد مغذی مورد نیاز برای تخمیر هستند (Jahid et al. 2018). ارزان بودن پسماند موز می‌تواند جایگزینی برای محصولات کشاورزی باشد. از پسماند موز برای تولید اتانول زیستی نسل اول استفاده می‌شوند (Guerrero et al. 2018). پوست موز و پسماند موز (فاسد) به عنوان ماده مغذی برای مخمر ساکارومایسس سرویزیه عمل می‌کنند. و مخمر ساکارومایسس سرویزیه این منابع مغذی را به اتانول تبدیل می‌کند. مخمر ساکارومایسس سرویزیه، یک مخمر مناسب برای تخمیر است؛ زیرا می‌تواند در حضور مقادیر بیشتری از قندها به خوبی رشد کند؛ بنابراین به طور موثر اتانول و دی اکسید کربن تولید می‌کنند. آماده‌سازی اسیدی ماده مغذی، فرآیند هیدرولیز لیگنین را آسان‌تر می‌کند؛ و شرایط مناسبی را برای مخمر ایجاد می‌کند؛ تا قندها را مصرف و منجر به تولید بیواتانول شود.

(Hossain et al. 2011). پسماند موز غنی از گلوکز و کربوهیدرات‌های دیگری هستند. این پسماندها می‌توانند با فعالیت آنزیمی همی سلولازها، سلولازها و پکتین به قند تبدیل شوند. پسماند موز ابتدا جمع‌آوری، شسته، به قطعات کوچک تبدیل و پس از آن، در مقابل آفتاب خشک می‌شود. تکه‌های خشک شده قبل از مخلوط شدن با آب مقطر، به پودر ریز خرد می‌شوند. در ادامه، مخلوط با اسید سولفوریک تصفیه شده؛ و بعد از آن، مخلوط با استفاده از اتوکلاو پردازش می‌شود. مخلوط اتوکلاو شده، خنک می‌شود؛ سپس، آنزیم‌هایی مانند همی سلولاز، سلولاز و پکتیناز به آن اضافه می‌شوند؛ تا هیدرولیز آنزیمی تشکیل شود. این مخلوط به مدت یک ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد در شرایط تخمیر قرار می‌گیرد (Wu et al. 2016). آنگاه، هیدرولیز آنزیمی با کشت مخمر اختصاصی آغاز می‌شود. فرآیند تخمیر بی‌هوازی برای ۳ تا ۷ روز در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد و با pH بین ۵ تا ۵/۵ و با هم‌زدن آغاز می‌شود. در فواصل زمانی منظم، نمونه‌های کوچکی گرفته و آنالیز می‌شوند؛ تا غلظت بیواتانول را تشخیص دهند. در این شرایط کنترل شده، مقادیر آب ماده مغذی نقش ضروری دارد؛ زیرا هرچه مقادیر آب بیشتر باشد، عملکرد تولید بیواتانول بیشتر خواهد بود. بیواتانول تولید شده با فرآیند تقطیر جدا می‌شود (Bello et al. 2014). در بیواتانول تولید شده، مقادیر کمی از فلزات سنگین سمی مانند کروم، مولیبدن و سرب یافت می‌شوند؛ در حالی که مقادیر بیشتری از منیزیم، کلسیم، منگنز و فسفر در آن حضور دارند (Hossain et al. 2011). مقادیر نسبتاً کمی از عناصر سمی، باعث می‌شود بیواتانول مناسب برای استفاده به عنوان سوخت باشد. بنابراین، پسماند موز به نظر می‌رسد برای تولید بیواتانول قابلیت‌های امیدوارکننده‌ای داشته باشد. انبه یک میوه با دوره زمان نگهداری کوتاه است. انبه بلافاصله پس از برداشت محصول و تا رسیدن به مشتریان به راحتی فاسد می‌شود. کشورهای استوایی از بزرگترین تولیدکنندگان انبه هستند. بخش عمده‌ای از میوه انبه از گوشت تشکیل شده است؛ سپس پوست و هسته قرار می‌گیرند. میزان قندهای موجود در انبه بین ۱۸ تا ۲۰ درصد است؛ و به همین دلیل، پسماند انبه می‌تواند به عنوان ماده مغذی برای تولید بیواتانول استفاده شوند. تخمیر پسماند انبه به طور موثر توسط دو گونه مخمر به نام‌های *ساکارومایسس سرویزیه* و *کلویرومایسس مارکسیانوس*^۱ انجام می‌شود (Buenrostro-Figueroa et al. 2018). صنایع فرآوری میوه‌ها مقادیر قابل توجهی از پسماند میوه تولید می‌کنند. این پسماند میوه با فعالیت میکروبی برای تولید محصولات با ارزش استفاده می‌شوند. پوست میوه‌ها به عنوان منابع بسیار مناسب برای تولید ترکیبات زیست فعال عمل می‌کنند. حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد از انبه و ۲۰ تا ۳۰ درصد از پوست موز دور ریخته می‌شوند. این پسماندها باعث آلودگی محیط زیست می‌شود

1. *Kluyvermyces marxianus*

(Gashaw and Getachew 2014). از این پوست‌ها می‌توان به عنوان منابعی مواد ارزشمند مانند آنزیم‌های میکروبی قابل استفاده در مقیاس صنعتی، الکل اتیلیک (اتانول)، سرکه، شراب، گاز متان و خوراک دام تولید کرد (Zhang et al. 2005). آروموگام و منیکنندن (2011) پیامدهای پیش تصفیه با اسیدی، ساکارزی کردن و تولید اتانول از زیست توده میوه‌های انبه و موز را در حضور مخمر، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این محققان نشان داد که تولید بیواتانول در نمونه‌های مختلف میوه‌ها متغیر بود. بالاترین عملکرد در نمونه‌های مخلوط گوشت میوه و سپس در گوشت موز مشاهده شد. اما کمترین عملکرد در گوشت انبه مشاهده شد. پیش تصفیه با اسید از هیدرولیز آنزیمی مخلوط گوشت میوه‌ها (انبه و موز) و درادامه، تخمیر با مخمر، نه تنها عملکرد بالاتری در تولید اتانول نشان داد، بلکه کارایی تخمیر را هم افزایش داد. همچنین، سیرکار و همکاران (2008) مشاهده کردند که بازده اتانول در پوست موز کمی بیشتر از پوست انبه است. هیدرولیز گوشت میوه با استفاده از روش‌های آب داغ مایع و پیش تصفیه با اسید رقیق با غلظت کم بدون هیدرولیز آنزیمی، نسبت به فرآیند عادی تخمیر، عملکرد ضعیفی در تولید بیواتانول نشان داد. هاموند و همکاران (1996) کاهش بازده اتانول را از گوشت موز رسیده بدون هیدرولیز آنزیمی را بدست آوردند. مطالعه تخمیری انجام شده توسط جوشی و همکاران (2001) با استفاده از پوست موز همراه با مخمر، عملکردهای قابل توجهی در تولید بیواتانول نشان داد. مطالعات تخمیری اُنوکا و همکاران (1997) نشان داد که پوست موز سبز و موز دارای عملکرد بالاتری در تولید الکل و مقادیر قند قابل تخمیر هستند. بالاترین بازده اتانول در مخلوط گوشت پسماند انبه و موز مشاهده شد؛ اما کمترین بازده اتانول در پوست انبه مشاهده شد. با افزایش بازده اتانول و رشد مخمر در طول فرآیند تخمیر گوشت مخلوط میوه‌ها، افزایش متوسط در مقدار تولید اتانول مشاهده شد. این امر منجر به افزایش عملکرد اتانول شد. رشد مخمر در مورد گوشت مخلوط میوه‌ها در ۴۸ ساعت بیشترین مقدار را داشت، اما رشد مخمر در مورد پوست میوه‌ها در ۴۲ ساعت بیشترین مقدار را داشت. گزارشات قبلی نشان داده‌اند که برای هیدرولیز آنزیمی پیش تصفیه شده با اسید، تقریباً ۲۴ ساعت کافی است؛ تا بازده بیشترین مقدار بیواتانول ارائه شود (Sharma et al. 2004). زمانی که تأمین ماده مغذی کاهش یابد، تبدیل سریع قندها به اتانول توسط مخمر ممکن است کاهش یابد. اکین-اسانایه و همکاران (2005) گزارش کردند که تولید اتانول از پسماند کشاورزی به مقدار مخمر اضافه شده بستگی دارد. دلایلی که ممکن است منجر به کاهش تولید اتانول پس از ۴۸ ساعت در گوشت میوه‌های مخلوط و ۴۲ ساعت در پوست میوه‌ها شوند، می‌تواند شامل کاهش در دسترس بودن ماده مغذی برای مخمر در فرآیند تخمیر، کاهش تعداد سلول‌های فعال مخمر، یا تغییر شکل آنزیمی باشد. کاهش عملکرد اتانول در مورد پسماند میوه انبه ممکن

است، به دلیل تأثیر مهارکننده مقادیر پلی فنول‌های بالا یا مقدار ناکافی قند قابل تخمیر پس از فرآیند تبدیل به قند باشد. با این حال، با استفاده از تخمیر توسط مخمر، عملکردهای قابل توجهی در تولید بیواتانول از گوشت انبه به دست آمد. تولید بیواتانول از گوشت میوه‌های موز رسیده، پرتقال، خرمالوی هندی^۱ و خربزه درختی^۲ توسط آزاد و یسمین (2019) مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند که موز نه تنها دارای بالاترین میزان قند در مقایسه با سایر میوه‌ها است، بلکه بازده بیواتانول آن نیز به اندازه کافی بالا است. میوه خرمالوی هندی کمترین مقدار اتانول را تولید می‌کند. تولید اتانول زیستی از چهار نوع مختلف موز به نام‌های شامپا^۳، بیچیکولا^۴، سابری^۵ و ساگور^۶ توسط کومار و همکاران آزمایش شد (2015). آنها دریافتند که نوع ساگور بالاترین میزان قند را نسبت به سه نوع دیگر دارد؛ و مقدار قابل توجهی اتانول زیستی با کاهش موثر در مقادیر قند کل پس از تخمیر تولید می‌کند. رقم بیچیکولا کمترین مقدار اتانول را تولید کرد. پسماند انگور، سیب، موز و خربزه درختی که در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و pH ۵/۴ برای تخمیر پردازش شدند، مقادیر قابل توجهی از بیواتانول تولید کردند (Janani et al. 2013). عملکرد اتانول از آبمیوه میوه ای از تیره انجیرها نیز قابل قبول بود (Kumoro et al. 2012). پسماند موز (درخت موز موسی/کومیناتا)^۷ دارای غلظت بالایی از مونومرهای قندی هستند؛ و دمای بهترین بازده اتانول و بیشترین مقدار تولید اتانول با استفاده از مخمر ساکارومایسس سرویزیه در ۳۵ درجه سانتیگراد گزارش شده است (Chandel et al. 2007). کاهش تولید اتانول در دماهای پایین‌تر (۲۳ درجه سانتیگراد) مشاهده شده است؛ زیرا در دماهای پایین، فعالیت متابولیسمی مخمر برای انجام تخمیر قند موثر نیست. همزدن نیز بر تولید بیواتانول تأثیری ندارد. مقادیر آب تأثیر قابل توجهی بر بازده اتانول دارد؛ به عنوان مثال، افزودن حجم کافی آب به پوره موز تخمیر شده، باعث افزایش تولید اتانول می‌شود. پوره موز تخمیر شده بدون تبدیل به قند آنزیمی در مقایسه با پوره موز ترکیب شده با آنزیم‌ها (پکتیناز و سلولازها) منجر به بازده بیواتانول کمتری شد (Uçkun et al. 2015). پوره موزی که با پکتیناز ترکیب شده است، باعث افزایش بازده بیواتانول می‌شود. این امر به دلیل این است که تجزیه پکتین توسط پکتیناز منجر به کاهش ظرفیت نگهداری آب می‌شود؛ بنابراین مقدار بیشتری آب آزاد می‌شود. این امر برای تولید اتانول مفید است. عملیات حرارتی یک مرحله ضروری برای

1. Sapota

2. Papaya

3. Champa

4. Bitchikola

5. Sabri

6. Sagor

7. Musa acuminata

تبدیل به قند آنزیمی موثر است؛ زیرا خطر آلودگی باکتریایی را کاهش می‌دهد؛ و علاوه بر این، تبدیل قند به الکل را افزایش می‌دهد (Cheirsilp and Umsakul 2008). عملیات حرارتی پوره موز برای مدت کوتاه تری منجر به تبدیل به قند کامل آنزیمی می‌شود. پردازش پکتیناز پوره موز در pH ۵ و دمای انکوباسیون ۴۰ درجه سانتیگراد باعث افزایش بازده بیواتانول می‌شود. آنزیم پکتیناز همچنین منجر به حداکثر هیدرولیز پسماند پوره موز شد. بسیاری از مطالعات گزارش کرده‌اند که تخمیر آنزیمی منجر به بازده بیشتری در تولید بیواتانول از محصولات سبزیجات و آبمیوه‌ها می‌شود (Leng 2008). آبمیوه خالص موز بسیار چسبناک، مات و خاکستری رنگ است؛ و در طول ذخیره‌سازی رسوب می‌کند؛ در نتیجه، باید به صورت آنزیمی پردازش شود؛ تا آبمیوه مصرفی به دست آید (Singh et al. 2012). بعد از افزودن آنزیم، پوره موز معمولاً در دستگاه بن ماری برای استخراج آبمیوه موز قرار می‌گیرد؛ زیرا این مرحله باعث افزایش بازده آبمیوه، افزودن طعم به آن و بهبود رنگ می‌شود. عملیات حرارتی قبل از افزودن مخمر، آنزیم‌های موجود در آبمیوه را غیرفعال می‌کند (Lee et al. 2006). پوره موز تخمیر شده مقادیر لزج (چسبندگی) بالایی را نشان می‌دهد. الکل خالص دارای کمترین مقدار لزج (چسبندگی) است. افزودن آنزیم به پوره موز تخمیر شده مقادیر لزج (چسبندگی) را کاهش می‌دهد؛ بنابراین رقیق شدن پلی‌ساکاریدهای غیرقابل حل موجود در دیواره‌های سلولی موز را آسان تر می‌کند. رقیق کردن محیط نیز یک مرحله ضروری است؛ زیرا فشار اسمزی را کاهش می‌دهد. تولید بیواتانول از پوره موز تخمیر شده با غلظت‌های مختلف مخمر و با نمونه‌های pH مختلف، تغییراتی در تعداد عناصر موجود نشان داده است. بیشترین مقدار سیلیکون از اتانول زیستی تولید شده از پوره موز تخمیر شده با مخمر به دست آمد؛ اما کمترین مقدار سیلیکون از پوره موز حاصل از میوه موز پوسیده به دست آمد. در طول فرآیند پردازش میوه‌های تازه و پوسیده موز، عناصری مانند روی، کلسیم و منیزیم با غلظت‌های مختلف مخمر و دامنه‌های pH مختلف، اولویت یا اهمیت بیشتری نسبت به سایر عناصر نشان دادند. روی، منیزیم و کلسیم و آهن در بیواتانول حضور دارند؛ و حتی اگر به مقادیر بیشتری وجود داشته باشند، ضرری ندارند؛ اما بیواتانول تولید شده از پوره موز حاوی سرب نمی‌باشد (Ghobadian et al. 2008). سنت پیر و همکاران (2005) عناصر کمیاب اتانول زیستی را با استفاده از روش تبخیر الکتروترمال-طیف‌سنجی جرمی جفت شده القایی پلاسما تجزیه و تحلیل کردند؛ و نتایج مثبتی یافتند. اولیویرا و همکاران (2002) از روش طیف‌سنجی جذب اتمی الکتروترمال استفاده کردند؛ و همچنین در تعیین مقدار عناصر کمیاب موجود در بیواتانول موفق بودند. بیواتانول به عنوان محصول نهایی می‌تواند در عملکرد موتورهای بنزینی استفاده شود.

۳-۴-۵ از پوست سیب زمینی

محصولات سیب زمینی در بین غذاهای فرآوری شده محبوبیت بیشتری دارند. بخش عمده غده سیب زمینی از نشاسته (کربوهیدرات) و به دنبال آن بخش کوچکی از پروتئین تشکیل شده است (Puttongsiri et al. 2012). اتلاف عمده در محصولات سیب زمینی به روش های تخمیر سیب زمینی مرتبط هستند. پوست سیب زمینی می تواند به جای دفن، به محصولات با ارزش به عنوان مثال، تولید الکل از پسماند سیب زمینی تبدیل شود. محصولات جانبی تولید شده در طول فرآیند تولید غده های سیب زمینی می توانند به عنوان ماده اولیه مناسب برای تولید بیواتانول مورد استفاده قرار گیرند (Kawa- Rygielska et al. 2012). ماده اولیه نشاسته ای در فرآیند تولید اتانول به مایع تبدیل می شود؛ سپس از طریق فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر، اتانول تولید می شود (Pervez et al. 2014). مطالعه آدو و همکاران (2009) مشارکت متابولیکی همزیستی بین مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* و قارچ *آسپرژیلوس نیجر* را در یک محیط نشاسته ای شناسایی کردند. این مشارکت متابولیکی منجر به افزایش بازده اتانول شد. باقیمانده جامد جمع آوری شده پس از تولید اتانول، حاوی مقدار زیادی عناصر غذایی ضروری است؛ و احتمالاً می تواند به عنوان کود زیستی مورد استفاده قرار گیرد. این باقیمانده هنگامی که با خاک مخلوط می شود، باعث بهبود بافت هوموس آلی خاک می شود؛ بنابراین مناسب برای بهبود رشد گیاهان است (Bhattacharyya and Banerjee 2007). بطور کلی، کمبود نیتروژن خاک را با کودهای شیمیایی جبران می کنند. این امر کیفیت و ساختار خاک را تخریب نموده و برای زنجیره غذایی حیوانات نیز مضر هستند. افزودن جلبک های سبز-آبی به خاک، نه تنها کمبود نیتروژن را برطرف می کند، بلکه خاک را با عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان نیز تامین می کند. گزارش شده است که جلبک سبز آبی هورمون های گیاهی (جیبرلین، اکسین)، اسیدهای آمینه و ویتامین های ضروری برای رشد و نمو گیاه را تولید می کند (Ananya and Ahmad 2014). تزریق کود زیستی به خاک یک روش مقرون به صرفه برای افزایش حاصلخیزی خاک است. چیتاگوتتا و همکاران (2016) اثر کشت مشترک مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* و *آسپرژیلوس نیجر* را بر تولید بیواتانول از پوره و پوست سیب زمینی بررسی کردند. آنها گزارش کردند که پوره سیب زمینی و پسماند پوست سیب زمینی منابع غنی نشاسته و سلولز همراه با قندهای قابل تخمیر جزئی و مقادیر پروتئین کم هستند. خولا و همکاران (2014) تفاوت هایی را در مقادیر پروتئین و نشاسته پوست سیب زمینی یافتند. این تفاوت ها می تواند به شرایط آب و هوایی مختلف و روش های برداشت سیب زمینی مرتبط باشد. هر دو پوره و پوست سیب زمینی زمانی که با کشت مشترک مخمر

ساکارومایسس سرویزیه و اسپرژیلوس نیجر ترکیب شدند، تولید اتانول قابل توجهی را در ۲۴ ساعت نشان دادند. آراپوگلو و همکاران (2010) همچنین تولید اتانول از پسماند پوست سیبزمینی را با فرآیند ساکارزی کردن و سپس تخمیر با استفاده از مخمر ساکارومایسس سرویزیه مورد بررسی قرار دادند. تخمیر ساقه‌های ذرت با استفاده از قارچ اسپرژیلوس نیجر و مخمر ساکارومایسز سرویزیه نیز باعث تولید بازده قابل قبول اتانول می‌شود. بازده کل اتانول و میانگین بهره وری از پوست سیب زمینی کمتر از پسماند پوره بود. نرخ هیدرولیز نشاسته به شکل قابل توجهی در هر دو پسماند پوست سیبزمینی و پوره سیبزمینی بدست آمد. به نظر می‌رسد که قارچ اسپرژیلوس نیجر، آنزیم آمیلاز را تولید می‌کند. این آنزیم فرآیند تبدیل نشاسته به قندهای کاهنده را افزایش می‌دهد. سپس این قندهای کاهنده توسط مخمر ساکارومایسز سرویزیه برای تولید اتانول استفاده می‌شوند (Satish 2010). تخمیر در حالت جامد یک ابزار موثر برای تولید آنزیم آمیلاز در قارچ اسپرژیلوس نیجر است؛ زیرا با مدت زمان کوتاه‌تری هیدرولیز نشاسته را کامل می‌کند. پوره سیبزمینی و پوست سیبزمینی پس از تولید اتانول می‌توانند با هم مخلوط شوند؛ و به عنوان ماده اولیه برای میکروب‌های تولیدکننده نیتروژن، فسفر و پتاسیم استفاده شوند. این میکروب‌ها به بهبود باروری خاک کمک می‌کنند (Suganthi et al. 2011). چیتاگوتا و همکاران (2016) تأثیر میکروب‌های مختلف خاک را در مقادیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم بررسی کردند. در این مطالعه از (سیانوباکتری آنابنا واریابلیس^۱، آزوسپیریلوم لیپوفرورم^۲، ازتوباکتر کرکوکوم^۳، کروموسیفلا موسکولا^۴، فیشرلا موسکولا^۵ و نوستوک موسکورم^۶) به عنوان میکروب‌های خاک استفاده شد. در این مطالعه، پسماند پوره سیبزمینی و کود زیستی حاصل از پوست سیبزمینی با این میکروب‌ها ترکیب شدند؛ و در مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. آنها بالاترین میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم را با باکتری آنابنا واریابلیس در مقایسه با سایر میکروب‌های خاک یافتند. سلول‌های رویشی باکتری آنابنا PCC 7120 از گلوتامات به عنوان منبع تغذیه استفاده می‌کنند. گلوتامات با سایر اسیدهای آمینه به گلوتامین تبدیل می‌شود؛ و سلول‌های هتروسیست را تغذیه می‌کند. و این اسیدهای آمینه توسط سلول‌های رویشی برای تثبیت نیتروژن استفاده می‌شوند (Kumar et al. 2010). سیانوباکتری‌های حل‌کننده فسفر، با استفاده

-
1. *Anabaena variabilis*
 2. *A. lipoferum*
 3. *A. fertilissima*
 4. *A. chroococcum*
 5. *Chromocypella muscicola*
 6. *Fischerella muscicola*
 7. *Nostoc muscorum*

از اسیدهای آلی، فسفر معدنی را از پیش‌ماده به فسفر محلول تبدیل می‌کنند. برخی از باکتری‌های حل‌کننده فسفر گرم منفی نیز همین قابلیت را دارند. گونه‌های باسیلوس می‌توانند پتاسیم خاک را حل کنند. ترکیب باکتری فلاووباکتریوم موسیکولا^۱، آزوسپیریلوم لیوفروم^۲ و آزوسپیریلوم فرتیلیسیموم^۳ با باقی مانده ی پسماند سیب زمینی نشان داد که میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک افزایش یافته است. باکتری نوستاک^۴ ترکیباتی مانند نوستوسیکلامید (متابولیت ضد سیانوباکتری) تولید می‌کند. این ترکیبات می‌تواند تأثیری بر روی ساختار باکتری آنابنا داشته باشد؛ به طور مشابه، رنگدانه نوستوسین A تولید شده توسط باکتری نوستاک سپانجیفرم می‌تواند رشد بسیاری از گونه‌های سیانوباکتری را مهار کند (Maheep 2014). باکتری فرانکی موسکولا یک متابولیت ثانویه به نام فیشرلین A تولید می‌کند. این متابولیت ثانویه جریان الکترون را در فتوسیسستم II در برخی از سیانوباکتری‌ها مهار می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که تثبیت نیتروژن توسط سیانوباکتری‌ها نه تنها در کشت برنج مفید است، بلکه حاصلخیزی خاک را نیز افزایش می‌دهد (Gantar et al. 2008). کود زیستی به دست آمده از پسماند سیب زمینی می‌تواند خاک را با مقادیر نیتروژن کافی غنی کند. آزاد و یسمین (2019) تولید بیواتانول را از محصولات کشاورزی، یعنی سیب زمینی شیرین، سیب زمینی، کدو تنبل، هویج و ذرت، و همچنین از میوه‌های رسیده، به عنوان مثال: خربزه درختی، موز، خرما و لوی هندی و پرتقال تعیین کردند. آنها دریافتند که در بین محصولات کشاورزی، سیب زمینی شیرین دارای بالاترین میزان قند است. این قند نشان دهنده تولید بیواتانول بالا است. کدو تنبل با مقادیر شیرینی کم دارای کمترین بازده بیواتانول بود. تولید بیواتانول از سبزیجات نشاسته‌ای (سیب زمینی شیرین) با تخمیر متوالی در مراحل متعدد به دلیل مقادیر بیشتر قندهای قابل تخمیر، عملکرد کمتری را نشان داد (Hadiyanto et al. 2013). سیب زمینی قرمز علاوه بر این، در کشور نپال بازدهی قابل توجهی از بیواتانول را به همراه داشت (Joshi 2014). بوراتی و همکاران (2008) تولید بیواتانول بیشتری را از ذرت له شده گزارش کردند. حذف آب از اتانول یک مرحله پرخطر است. به ویژه زمانی که محصولات کشاورزی به عنوان ماده اولیه استفاده می‌شوند. همچنین، آنها راه حلی برای غلبه بر این موضوع پیدا کردند. آنها پیشنهاد کردند که پمپ کردن خمیر تخمیرشده از طریق سیستم تقطیر چند ستونی، به راحتی می‌تواند آب را از اتانول جدا کند.

1. *F. muscicola*2. *Azospirillum lipoferum*3. *A. fertilissima*4. *Nostoc*

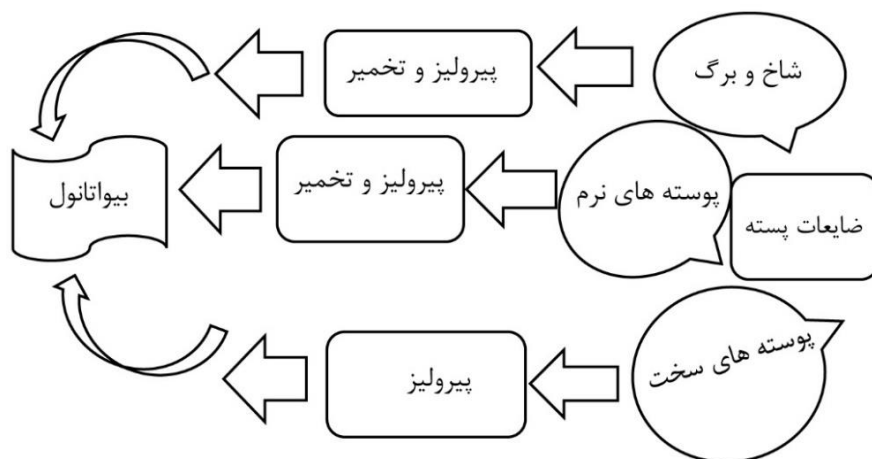
۳-۴-۱-۶ از پسماند پسته

در حال حاضر ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده پسته است؛ اما پسماند تولید شده و دفع آن‌ها پس از حذف دانه‌های پسته، مشکل بزرگی در ایران است (Açikalin et al. 2012). با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان پوست پسته را به سوخت زیستی برای تولید انرژی تبدیل کرد (Peters 2011). در مقیاس صنعتی، زیست توده حاصل از پسته‌ها می‌تواند به طور مستقیم به انرژی تبدیل شود. روش غیرمستقیم تبدیل شامل تبدیل به بیواتانول، بیودیزل، روغن زیستی و بیوگاز است (Sharma et al. 2015). بیواتانول از تخمیر قند، سلولز و نشاسته تولید می‌شود و می‌تواند به عنوان سوخت برای موتورهای کاربرد دارد (Sequeira et al. 2007). روش‌های ترموشیمیایی و بیوشیمیایی را می‌توان در استفاده از زیست توده پسته نیز استفاده کرد. هضم بی‌هوازی یا هوازی و تخمیر الکلی روش‌های رایج بیوشیمیایی هستند که در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ahmed et al. 2015). گازسازی و پیرولیز روش‌های ترموشیمیایی رایج هستند (Morales et al. 2014). پسته‌ها پس از جدا کردن پوست، در تهیه محصولات غذایی و دارویی دارند، استفاده می‌شوند (Tomaino et al. 2010). پوسته سبز پسته سرشار از آنتی اکسیدان و همچنین چربی، پروتئین، ویتامین و مواد معدنی است (Mohammadi Moghaddam et al. 2009). دفع پوسته پسته تهدیدی برای محیط زیست است؛ زیرا خاک را آلوده می‌کند؛ و متان تولید می‌کند. متان برای محیط زیست مضر است. پوست پسته سرشار از سلولز و به دنبال آن لیگنین است؛ و حاوی هیدروژن، اکسیژن، کربن و نیتروژن می‌باشد.

پسماند پوست پسته دارای مقادیر رطوبت بالا هستند، در حالی که چوب درختان پسته و پوست‌های خالی دارای مقادیر رطوبت پایین هستند. فرآورده‌های بیوشیمیایی و ترموشیمیایی را می‌توان برای تبدیل پسماند پسته (پوسته خالی و سبز و همچنین چوب) برای تولید سوخت زیستی مورد استفاده قرار داد (Ebrahimi Meymand et al. 2013). برای تبدیل پسماند پسته به سوخت‌های زیستی می‌توان از روش‌های تخمیر، پیرولیز و هضم استفاده کرد. تقی زاده علیسرایی و همکاران (2017b) کارایی پوسته پسته را با تخمیر و پیرولیز برای تولید بیواتانول و بیوگاز بررسی کرد و بازده خوبی به دست آورد (شکل ۳-۹).

۳-۴-۱-۷ عوامل موثر بر تولید بیواتانول

عوامل متعددی بر عملکرد اتانول زیستی تأثیر می‌گذارند. انواع مختلف پسماند غذایی نسبت‌های متفاوتی از بیواتانول تولید می‌کنند (جدول ۳-۱).



شکل ۳-۹. تولید بیواتانول از پسماند پسته (برگرفته از 2020 Bhuvaneswari and Sivakumar)

الف) دما:

مشاهده شده، سلول‌های مخمر ساکارومایسس سرویزیه پس از شروع تخمیر به صورت نمایی افزایش می‌یابند؛ و پس از ساعت‌های طولانی تخمیر در تمام دماهای فعال وارد فاز ساکن می‌شوند (Torija et al. 2003). افزایش دما باعث کاهش زمان تخمیر می‌شود. در دماهای بالا، رشد سلول‌های مخمر ساکارومایسس سرویزیه متوقف می‌شود؛ و به همین دلیل، عملکرد بیواتانول تحت تأثیر قرار می‌گیرد. دمای بالا موجب تداخل با مقدار حلال و مواد محلول مورد نیاز برای رشد مخمر ساکارومایسس سرویزیه می‌شود؛ و سموم نیز تجمع می‌یابند. به طور مشابه، دمای پایین به دلیل مقاومت کمتر اتانول باعث رشد آهسته سلول‌ها می‌شود (Lin et al. 2012).

ب) غلظت مواد اولیه:

مواد اولیه اجزای ضروری برای رشد میکروبی در طی تخمیر هستند. اگر غلظت مواد اولیه بالا باشد، هیدرولیز انجام می‌شود؛ زیرا مکان‌های فعال تری از آنزیم‌ها برای اتصال به ماده هدف در دسترس هستند. غلظت ماده هدف و تعداد آنزیم ثابت بازده بیواتانول را کاهش می‌دهد (Cheng et al. 2009). اتصال کمتر ماده هدف با محل فعال آنزیم منجر به بازده کم اتانول می‌شود. افزایش غلظت مواد اولیه باعث افزایش تولید بیواتانول می‌شود. با این حال، قرار گرفتن در معرض بیش از حد طولانی با غلظت بالاتر مواد اولیه نیز می‌تواند عملکرد بیواتانول را تغییر دهد (Triwahyuni et al. 2015).

جدول ۳-۱. انواع پسماند غذایی و بازده آنها پس از هیدرولیز (برگرفته از Yukeşh Kannah et al. 2020)

رديف	پيش نياز	نوع هيدروليز	عامل هيدروليز	شرایط هيدروليز	بازده هيدروليز	منابع
۱	ضایعات میوه	آنزیم مخلوط	کربوهیدرات + پروتئاز	دما: ۳۰ درجه سانتی گراد	قند قابل تخمیر: ۰/۶۳ گرم در هر گرم	Kim et al. (2011)
				سرعت مخلوط کردن: ۱۵۰ دور در دقیقه		
				pH: ۴/۵		
				زمان: ۱۲ ساعت		
۲	ضایعات آشپزخانه	آنزیم مخلوط متوالی	آلفا-آمیلاز	pH: ۵/۵	قند قابل تخمیر: ۶۴/۷ گرم در هر لیتر	Uncu and Cekmecelioglu (2011)
				زمان: ۱ ساعت		
				دما: ۹۵ درجه سانتی گراد		
				سرعت مخلوط کردن: ۱۵۰ دور در دقیقه		
			آنزیم گلوکوآمیلاز	pH: ۵/۵		
				زمان: ۶ ساعت		
				دما: ۶۰ درجه سانتی گراد		
				سرعت مخلوط کردن: ۱۵۰ دور در دقیقه		

ردیف	پیش نیاز	نوع هیدرولیز	عامل هیدرولیز	شرایط هیدرولیز	بازده هیدرولیز	منابع
۳	ضایعات میوه	پوره قارچی	قارچ آسپرژیلوس آواموری و آسپرژیلوس اوریزه	pH ۴/۴-۵	بازده گلوکز: ۱۴۳ گرم در هر لیتر	Pleissner et al. (2014)
				زمان: ۲۴ ساعت		
				مقدار: ۸/۵ گرم در هر ۱۰۰ گرم ضایعات غذایی		
				دما: ۶۰ درجه سانتی گراد		
۴	ضایعات آشپزخانه	آنزیم	آنزیم گلوکوامیلاز	pH ۵	راندمان تبدیل: ۷۹ درصد قند قابل تخمیر: ۰/۷۹ گرم در هر گرم	Hafid et al. (2015)
				زمان: ۶ ساعت		
				مقدار: ۸۵ واحد در هر میلی لیتر		
				دما: ۶۰ درجه سانتی گراد		
۵	ضایعات میوه	پوره قارچی	قارچ آسپرژیلوس آواموری و آسپرژیلوس اوریزه	pH ۴/۴-۵	بازده گلوکز: ۱۲۷ گرم در هر لیتر	Uçkun Kiran and Liu (2015)
				زمان: ۲۴ ساعت		
				مقدار: ۷/۷ گرم در هر لیتر		
				دما: ۶۰ درجه سانتی گراد		
۶	ضایعات آشپزخانه	آنزیم	آنزیم گلوکوامیلاز	pH ۵	راندمان تبدیل: ۵۹/۳۷ درصد قند قابل تخمیر: ۶۲/۶۲ گرم در هر لیتر	Hafid et al. (2016)
				زمان: ۱۰ ساعت		
				مقدار: ۷۰ واحد در هر میلی لیتر		
				دما: ۶۰ درجه سانتی گراد		

ردیف	پیش نیاز	نوع هیدرولیز	عامل هیدرولیز	شرایط هیدرولیز	بازده هیدرولیز	منابع
۷	ضایعات میوه	اسید	اسید هیدروکلریک	زمان: ۱ ساعت	راندمان تبدیل: ۴۲/۴ درصد	Hafid et al. (2017)
				مقدار: ۱/۵ درصد حجمی به حجمی	شکر قابل تخمیر: ۵۰/۵ گرم در هر لیتر	
				دما: ۹۰ سانتی گراد		
۸	ضایعات میوه	آنزیم	آنزیم گلوکوآمیلاز	pH: ۵	راندمان تبدیل: ۵۰/۶ درصد	Hafid et al. (2017)
				زمان: ۶ ساعت		
				مقدار: ۸۵ واحد در هر میلی لیتر	شکر قابل تخمیر: ۶۰/۳۲ گرم در هر لیتر	
				دما: ۶۰-۵۵ درجه سانتی گراد		
۹	ضایعات میوه	هیدرولیز متوالی با اسید و آنزیم	اسید کلریدریک + آنزیم گلوکوآمیلاز	زمان: ۱ ساعت	کارایی تبدیل: ۸۶/۸ درصد	Hafid et al. (2017)
				مقدار: ۱/۵ درصد حجمی به حجمی		
				دما: ۹۰ درجه سانتی گراد	شکر قابل تخمیر: ۱۰۳/۴ گرم در هر لیتر	
				pH: ۵		
				زمان: ۶ ساعت		
				مقدار: ۸۵ واحد در هر میلی لیتر		
				دما: ۶۰-۵۵ درجه سانتی گراد		

ردیف	پیش نیاز	نوع هیدرولیز	عامل هیدرولیز	شرایط هیدرولیز	بازده هیدرولیز	منابع
۱۰	ضایعات پوست گیاه گیاه ریشه نشاسته ای با پیش تصفیه خیساندن و حرارت دادن	آنزیم مخلوط متوالی	آلفا-آمیلاز	pH: ۷	راندمان	Aruwajoye et al. (2019)
				زمان: ۶۰ دقیقه	تبدیل: ۷۸/۶۶	
				دما: ۹۰ درجه سانتی گراد	درصد	
			آنزیم آمیل گلوکوزیداز	pH: ۴/۵	قند قابل تخمیر: ۰/۵۸ گرم در هر گرم	
				زمان: ۲۴ ساعت		
				دما: ۶۰ درجه سانتی گراد		
		سلولاز	pH: ۵/۵			
			زمان: ۱۲۰ دقیقه			
			دما: ۵۵ درجه سانتی گراد			

ج) pH

pH نقش مهمی در تخمیر دارد. در صورتی که pH محیط، اسیدی متعادل باشد، تولید بیواتانول بیشتر می‌شود. در PH کمی اسیدی، نفوذپذیری سلول‌ها به برخی مواد مغذی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Ritslaid et al. 2010). مطالعات نشان می‌دهند که مخمر ساکارومایسس سرویزیه برای رشد و مقاومت خود، pH در بازه ۲/۷۵ تا ۴/۲۵ را ترجیح می‌دهد. برای تولید اتانول از طریق تخمیر، محدوده pH ۴ تا ۴/۲۵ بهترین است. اگر pH به زیر ۴ کاهش یابد، بازدهی اتانول تأثیر زیادی نخواهد داشت؛ اما نیاز به زمان تخمیر بیشتری خواهد بود. بازدهی اتانول کاهش می‌یابد اگر pH بالاتر از ۵ شود (Zabed et al. 2014).

د) زمان تخمیر:

زمان تخمیر بر سرعت رشد میکروبی تأثیر می‌گذارد. اگر زمان تخمیر کوتاهتر از زمان لازم باشد، موثر نخواهد بود؛ زیرا میکروب‌ها قادر به حداکثر رشد خود نیستند. به طریق مشابه، زمان بالای تخمیر نیز به دلیل غلظت بالا اتانول در محلول، رشد سلول‌های مخمر ساکارومایسس

سرویزیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ اما دمای پایین و زمان بالای تخمیر نیز منجر به تولید کمتر اتانول می‌شود (Zabed et al. 2014). سرعت همزدن ورود مواد غذایی به سلول‌های مخمر از محلول تخمیر است؛ و در نتیجه دفع اتانول از سلول‌ها به محلول را نیز تنظیم می‌کند. با افزایش سرعت همزدن، بازدهی اتانول افزایش می‌یابد. این نرخ، جذب قند را فعال می‌کند؛ و در نتیجه بازدهی اتانول افزایش می‌یابد. به طور کلی، برای سلول‌های مخمر، سرعت همزدن ۲۰۰-۱۵۰ دور در دقیقه است. استفاده از سرعت همزدن بالا، نه تنها بر فعالیت متابولیسی سلول‌های مخمر تأثیر می‌گذارد، بلکه تولید اتانول خالص را نیز تغییر می‌دهد. غلظت نمونه بر عملکرد قند و مصرف اتانول تأثیر می‌گذارد (Laopaiboon et al. 2017). اگر تعداد سلول‌ها از 1×10^4 تا 1×10^7 سلول در میلی‌لیتر افزایش یابد، بازدهی بیشتری از اتانول حاصل می‌شود. با این حال، اگر غلظت نمونه اولیه به 10^7 یا 10^8 برسد، تفاوت قابل توجهی در بازدهی اتانول مشاهده نمی‌شود. به طور معمول، در غلظت بالای نمونه اولیه، کاهش زمان تخمیر گزارش شده است؛ زیرا در این مرحله، سلول‌های مخمر به سرعت افزایش می‌یابند (Zabed et al. 2016).

۳-۵ نتیجه گیری

در چند سال اخیر میزان پسماند مواد غذایی و همچنین پسماند میوه و سبزیجات افزایش چشمگیری داشته است؛ و دفع آنها تهدید جدی برای محیط است. روش‌های رایج مورد استفاده برای دفع پسماند میوه و سبزیجات شامل سوزاندن، غذا برای دام، تشکیل کمپوست یا تلنبار در محل‌های دفن زباله می‌باشد. اما دفع پسماند میوه و سبزیجات در محل‌های دفن زباله باعث بروز مشکلات جدی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش انتشار عوامل بیماری‌زا و آلودگی خاک، آب و هوا شده است. برای حل این مسئله به شیوه‌های مدیریت مواد غذایی سازگار با محیط زیست نیاز است؛ و یکی از این گزینه‌های مناسب، تبدیل پسماند میوه و سبزیجات به سوخت‌های زیستی است. تحقیقات زیادی در مورد قابلیت پسماند میوه و سبزیجات برای تولید سوخت زیستی انجام شده و هنوز ادامه دارد. محققان دریافته‌اند که پسماند میوه و سبزیجات را می‌توان به سوخت‌های زیستی، یعنی بیواتانول، هیدروژن زیستی، بیودیزل و بیوگاز تبدیل کرد. پسماندهای میوه و سبزیجات به سادگی و به فراوانی قابل دسترس، و غنی از کربوهیدرات هستند، و می‌توانند به طور طبیعی تجزیه شوند؛ بنابراین، می‌توانند به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی استفاده شوند. سوخت‌های فسیلی به سرعت به پایان می‌رسند. هیدرولیز پسماند میوه‌ها و سبزیجات با فعالیت میکروب‌ها در شرایط بی‌هوازی، قندها را به سوخت‌های زیستی تبدیل می‌کند. از این سوخت‌های زیستی می‌توان

برای پخت و پز، برق و تولید انرژی استفاده کرد. با اینکه تولید سوخت زیستی از پسماندهای میوه و سبزیجات مزایای بسیاری دارد؛ اما هنوز به صورت گسترده در مقیاس صنعتی و تجاری استفاده نشده است. با این حال، تحقیقات در سطح جهانی در حال ادامه است.

منابع

- Acheampong M, Ertem FC, Kappler B, Neubauer P (2017) In pursuit of Sustainable Development Goal (SDG) number 7: will biofuels be reliable? *Renew Sust Energy Rev* 75:927–937
- Açikalin K, Karaca F, Bolat E (2012) Pyrolysis of pistachio shell: effects of pyrolysis conditions and analysis of products. *Fuel* 95:169–177
- Ado SA, Olukotun GB, Ameh JB, Yabaya A (2009) Bioconversion of cassava starch to ethanol in a simultaneous saccharification and fermentation process by co-cultures of *Aspergillus niger* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Sci World J* 4:19–22
- Ahmed Y, Yaakob Z, Akhtar P, Sopian K (2015) Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renew Sust Energ Rev* 42: 1260–1278
- Akin-Osanaiye BC, Nzelibe HC, Agbaji AS (2005) Production of ethanol from (pawpaw) agro waste: effect of saccharification and different treatments on ethanol yield. *Afri J Biotech* 4(57): 59
- Ananya KA, Ahmad IZ (2014) Cyanobacteria “the blue green algae” and its novel applications: a brief review. *Int J Innov Appl Stud* 7:251–261
- Arapoglou D, Varzakas T, Vlyssides A, Israilides C (2010) Ethanol production from potato peel waste (PPW). *Waste Manag* 30:1898–1902
- Arshad M, Zia MA, Shah FA, Ahmad M (2018) An overview of biofuel. In: Arshad M (ed) *Perspectives on water usage for biofuels production*. Springer, Cham, pp 1–37
- Arumugam R, Manikandan M (2011) Fermentation of pretreated hydrolysates of banana and mango fruit wastes for ethanol production. *Asian J Exp Biol Sci* 2:246–256
- Aruwajoye GS, Faloye FD, Kana EG (2019) Process optimisation of enzymatic saccharification of soaking assisted and thermal pretreated cassava peels waste for bioethanol production. *Waste Biomass Valoriz* 11:2409–2420
- Atabani AE, El-Sheekh MM, Kumar G, Shobana S (2017) Edible and nonedible biodiesel feedstocks. In: Azad MGRAK, Subhash C (eds) *Clean energy for sustainable development, comparisons and contrasts of new approaches*. Academic Press, Boston
- Azad MAK, Yesmin MN (2019) Bioethanol production from agricultural products and fruits of Bangladesh. *Int J Geomate* 17:222–227
- Balasubramanian K, Ambikapathy V, Panneerselvam A (2011) Studies on ethanol production from spoiled fruits by batch fermentations. *J Microbiol Biotechnol Res* 1:158–163
- Bartowsky EJ, Henschke PA (2008) Acetic acid bacteria spoilage of bottled red wine-a review. *Int J Food Microbiol* 125:60–70
- Bello RH, Linzmeyer P, Franco CMB, Souza O, Sellin N, Medeiros SHW, Marangoni C (2014) Pervaporation of ethanol produced from banana waste. *Waste Manag* 34:1501–1509

- Bensah EC, Mensah M (2013) Chemical pretreatment methods for the production of cellulosic ethanol: technologies and innovations. *Int J Chem Eng* 2013:1–21
- Bhadana B, Chauhan M (2016) Bioethanol production using *Saccharomyces cerevisiae* with different perspectives: substrates, growth variables, inhibitor reduction and immobilization. *Ferment Technol* 5:1–5
- Bhattacharyya BC, Banerjee R (2007) *Environmental biotechnology*. Oxford University Press, Oxford
- Bhuvaneswari M, Sivakumar N (2020) Bioethanol production from fruit and vegetable wastes. In: Molina G, Gupta VK, Singh BN, Gathergood N (eds) *Bioprocessing for biomolecules production*, pp 417–427
- Blakeney M (2019) Food loss and food waste – causes and solutions. *Aust J Agric Resour Econ* 63(4)
- Buenrostro-Figueroa J, Tafolla-Arellano JC, Flores-Gallegos AC, Rodríguez-Herrera R, De la Garza-Toledo H, Aguilar CN (2018) Native yeasts for alternative utilization of overripe mango pulp for ethanol production. *Rev Argent Microbiol* 50:173–177
- Buratti C, Barbanera M, Fantozzi F (2008) Environmental balance of bioethanol from corn grain: evaluation of different procedures of co-products allocation. In: *Proceedings of 16th European conference & exhibition*, 2–6 June, Valencia
- Canilha L, Chandel AK, dos Santos Milessi TS, Antunes FAF, da Costa Frietes WL, Felipe MGA, da Silva SS (2012) Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation. *J Biomed Biotechnol* 2012:989572
- Cardoso WS, Tardin FD, Tavares GP, Queiroz PV, Mota SS, Catarina M, Kasuya M, Queiroz JHD (2013) Use of sorghum straw (*Sorghum bicolor*) for second generation ethanol production: pretreatment and enzymatic hydrolysis. *Quim Nova* 36:623–627
- Chandel AK, Es C, Rudravaram R (2007) Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnol Mol Biol Rev* 2:14–32
- Chang SK, Zhang Y (2017) Protein analysis. In: Nielsen SS (ed) *Food analysis*, 5th edn. Springer, Cham, pp 315–331
- Cheirsilp B, Umsakul K (2008) Processing of banana-based wine product using pectinase and -amylase. *J Food Process Eng* 31:78–90
- Cheng NG, Hasan M, Kumoro AC (2009) Production of ethanol by fed-batch fermentation, Pertanika. *J Sci Technol* 17:399–408
- Chintagunta AD, Jacob S, Banerjee R (2016) Integrated bioethanol and biomanure production from potato waste. *Waste Manag* 49:320–325
- Choi IS, Kim J-HH, Wi SG, Kim KH, Bae H-JJ (2013) Bioethanol production from mandarin (*Citrus unshiu*) peel waste using popping pretreatment. *Appl Energy* 102:204–210
- Choi IS, Lee YG, Khanal SK, Park BJ, Bae H, Seong I (2015) A low-energy, cost-effective approach to fruit and citrus peel waste processing for bioethanol production. *Appl Energy* 140: 65–74
- Conesa C, Segúí L, Fito P (2018) Hydrolytic performance of *Aspergillus niger* and *Trichoderma reesei* cellulases on lignocellulosic industrial pineapple waste intended for bioethanol production. *Waste Biomass Valoriz* 9:1359–1368

- Cypriano DZ, Silva LLD, Tasic L (2018) High value-added products from the orange juice industry waste. *Waste Manag* 79:71–78
- Dahmoune F, Boulekbache L, Moussi K, Aoun O, Spigno G, Madani K (2013) Valorization of Citrus limon residues for the recovery of antioxidants: evaluation and optimization of microwave and ultrasound application to solvent extraction. *Ind Crop Prod* 50:77–87
- De Castro MDL (2014) Towards a comprehensive exploitation of agrofood residues: olive tree - olive oil as example. *Comptes Rendus Chim* 17:252–260
- Del Campo I, Alegria I, Zazpe M, Echeverria M, Echeverria I (2006) Diluted acid hydrolysis pretreatment of agri-food wastes for bioethanol production. *Int J Ind Crops Prod* 24:214–221
- Demirbas A (2008) Biomethanol production from organic waste materials. *Energy Sources A Recovery Util Environ Eff* 30:565–572
- Devi S, Dhaka A, Singh J (2016) Acid and alkaline hydrolysis technologies for bioethanol production: an overview. *Int J Adv Technol Eng Sci* 4:94–106
- Dhiman S, Mukherjee G (2020) Present scenario and future scope of food waste to biofuel production. *J Food Process* 44:e13594
- Dutta K, Daverey A, Lin JG (2014) Evolution retrospective for alternative fuels: first to fourth generation. *Renew Energy* 69:114–122
- Ebrahimi Meymand H, Rahimi D, Marashi S (2013) The possibility of using pistachio waste as fuel in Rafsanjan city. In: *Proceedings of the 3th annual conference clean energy*, Kerman
- Elshahed MS (2010) Microbiological aspects of biofuel production: current status and future directions. *J Adv Res* 1:103–111
- Esparza I, Jiménez-Moreno N, Bimbela F, Ancín-Azpilicueta C, Gandía LM (2020) Fruit and vegetable waste management: conventional and emerging approaches. *J Environ Manag* 265: 110510
- Galbe M, Zacchi G (2002) A review of the production of ethanol from softwood. *Appl Microbiol Biotechnol* 59:618–628
- Gantar M, Berry JP, Thomas S, Wang M, Perez R, Rein KS, King G (2008) Allelopathic activity among Cyanobacteria and microalgae isolated from Florida freshwater habitats. *FEMS Microbiol Ecol* 641:55–64
- Gashaw A, Getachew T (2014) Fermentation of crop residues and fruit wastes for production of ethanol and its pretreatment methods a review. *Int J Res* 1:43–556
- Gebregers A, Gebresemati M, Sahu O (2016) Industrial ethanol from banana peels for developing countries: response surface methodology. *Pac Sci Rev A Nat Sci Eng* 18:22–29
- Ghobadian B, Rahimi H, Tavakouli Hashjin T, Khatami FarM (2008) Production of bioethanol and sunflower methyl ester and investigation of fuel blend properties. *J Agric Sci Technol* 10:225–232
- Gil S, Fito L, Maupoey P (2018) An integrated approach for pineapple waste valorisation. Bioethanol production and bromelain extraction from pineapple residues. *J Clean Prod* 172: 1224–1231
- Girish V, Ravikumar K, Girisha ST (2014) Estimation of sugar and bioethanol from different decaying fruits extract. *Adv Appl Sci Res* 5:106–110

- Giroto F, Alibardi L, Cossu R (2015) Food waste generation and industrial uses: a review. *Waste Manag* 45:32–41
- Graf A, Koehler T (2000) Oregon cellulose-ethanol study: an evaluation of the potential for ethanol production in Oregon using cellulose based feedstocks. Oregon Department of Energy, Salem, pp 1–36
- Greetham D, Zaky A, Makanjuola O, Du C (2018) A brief review on bioethanol production using marine biomass, marine microorganism and seawater. *Curr Opin Green Sustain Chem* 14:53–59
- Guerrero AB, Ballesteros I, Ballesteros M (2018) The potential of agricultural banana waste for bioethanol production. *J Fuel* 213:176–185
- Gunay ME, Turker L, Tapan NA (2019) Significant parameters and technological advancements in biodiesel production systems. *Fuel* 250:27–41
- Guo M, Song W, Buhain J (2015) Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective. *Renew Sust Energ Rev* 42:712–725
- Hadiyanto H, Ariyanti D, Aini AP, Pinundi DS (2013) Batch and fed-batch fermentation system on ethanol production from whey using *Kluyveromyces marxianus*. *Int J Renew Energy Dev* 2: 127–131
- Hafid HS, Rahman NA, Md Shah UK, Baharudin AS (2015) Enhanced fermentable sugar production from kitchen waste using various pretreatments. *J Environ Manag* 156:290–298
- Hafid HS, Abdul Rahman N, Md Shah UK, Samsu Baharudin A, Zakaria R (2016) Direct utilization of kitchen waste for bioethanol production by separate hydrolysis and fermentation (SHF) using locally isolated yeast. *Int J Green Energy* 13:248–259
- Hafid HS, Nor'Aini AR, Mokhtar MN, Talib AT, Baharuddin AS, Umi Kalsom MS (2017) Over production of fermentable sugar for bioethanol production from carbohydrate-rich Malaysian food waste via sequential acid-enzymatic hydrolysis pretreatment. *Waste Manag* 67:95–105
- Hammond JB, Egg R, Diggins D, Coble CG (1996) Alcohol from bananas. *Bioresour Biotechnol* 56(125):130
- Hayashida S, Ohta K, Flor PQ, Nanri N, Miyahara I (1982) High concentration-ethanol fermentation of raw ground corn. *Agric Biol Chem* 46:1947–1950
- Hayat K, Zhang X, Chen H, Xia S, Jia C, Zhong F (2010) Liberation and separation of phenolic compounds from citrus mandarin peels by microwave heating and its effect on antioxidant activity. *Sep Purif Technol* 73:371–376
- Heimann K (2016) Novel approaches to microalgal and cyanobacterial cultivation for bioenergy and biofuel production. *Curr Opin Biotechnol* 38:183–189
- Hossain ABMS, Fazlily AR (2010) Creation of alternative energy by bio-ethanol production from pineapple waste and the usage of its properties for engine. *Afr J Microbiol Res* 4:813–819
- Hossain ABMS, Salleh A, Boyce AN, Chowdhury P, Naquiuddin M (2008) Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *Am J Biochem Biotechnol* 4:250–254
- Hossain ABMS, Ahmed SA, Ahmed MA, Faris MAA, Annuar MSM, Hadeel M, Norah H (2011) Bioethanol fuel production from rotten banana as an environmental waste management and sustainable energy. *Afr J Microbiol Res* 5:586–598

- Isah S, Ozbay G (2020) Valorization of food loss and wastes: feed- stocks for biofuels and valuable chemicals. *Front Sustain Food Syst* 4:82
- Itelima J, Onwulin F, Onwulin E, Isaac O, Forji S (2013) Bio-ethanol production from banana, plantain and pineapple peels by simultaneous saccharification and fermentation process. *Int J Environ Sci Develop* 4:2137
- Jahid M, Gupta A, Sharma DK (2018) Production of bioethanol from fruit wastes (banana, papaya, pineapple and mango peels) under milder conditions. *J Bioprocess Biotech* 8:327
- Jain A, Chaurasia SP (2014) Bioethanol production in membrane bioreactor (MBR) system: a review. *Int J Environ Res Dev* 4:387–394
- Janani K, Ketzi M, Megavathi S, Vinothkumar D, Ramesh BNG (2013) Comparative studies of ethanol production from different fruit wastes using *Saccharomyces cerevisiae*. *Int J Innov Res Sci Eng Technol* 2:7161–7167
- Joshi J (2014) Enhanced production of ethanol from red potatoes in hilly regions of Nepal using various nitrogen sources. *Int J Appl Sci Biotechnol* 2:41–44
- Joshi SS, Dhopeswarkar R, Jadhav U, Jadhav R, D'souza L, Dixit J (2001) Continuous ethanol production by fermentation of waste banana peels using flocculating yeast. *Ind J Chem Tech* 8(153):156
- Karmee SK (2016) Liquid biofuels from food waste: current trends, prospect and limitation. *Renew Sust Energ Rev* 53:945–953
- Karmee SK, Lin CSK (2014) Lipids from food waste as feedstock for biodiesel production: case Hong Kong. *Lipid Technol* 26:206–209
- Karmee SK, Greiner L, Krayanov A, Müller TE, Niemeijer B, Leitner W (2010) Nanoparticle catalysed oxidation of sulfides to sulfones by in situ generated H₂O₂ in supercritical carbon dioxide/water biphasic medium. *Chem Commun* 46:6705–6707
- Katami T, Yasuhara A, Shibamoto T (2004) Formation of dioxins from incineration of foods found in domestic garbage. *Environ Sci Technol* 38:1062–1065
- Kawa-Rygielska J, Pietrzak W, Peksa A (2012) Potato granule processing line by- products as feedstock for ethanol production. *Polish J Environ Stud* 21:1249–1255
- Khandaker MM, Qiamuddin KB, Majrashi A, Dalorima T, Sajili MH, Hossain SABM (2018) Bio-ethanol production from fruit and vegetable waste by using *Saccharomyces cerevisiae*. *Biosci Res* 15:1703–1711
- Khandaker MM, Abdullahi UA, Abdulrahman MD, Badaluddin NA, Mohd KS (2020) Bio-ethanol production from fruit and vegetable waste by using *Saccharomyces cerevisiae*. In: *Bioethanol*. IntechOpen, London, pp 1–17
- Khawla BJ, Sameh M, Imen G, Donyes F, Dhouha G, Raoudha EG, Oumèma NE (2014) Potato peel as feedstock for bioethanol production: a comparison of acidic and enzymatic hydrolysis. *Ind Crop Prod* 52:144–149
- Kim S, Dale BE (2004) Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioenergy* 26:361–375
- Kim JH, Lee JC, Pak D (2011) Feasibility of producing ethanol from food waste. *Waste Manag* 31: 2121–2125
- Kiran EU, Trzcinski AP, Ng WJ, Liu Y (2014) Bioconversion of food waste to energy: a review. *Fuel* 134:389–399

- Koppram R, Tomas-Pejo E, Xiros C, Olsson L (2014) Lignocellulosic ethanol production at highgravity: challenges and perspectives. *Trends Biotechnol* 32:46–53
- Kosseva MR (2013) Recent European legislation on management of wastes in the food industry. Food industry wastes assessment and recuperation of commodities, eds. M.R. Kosseva and C. Webb. San Diego CA Academic Press, pp 3–15.
- Kour D, Rana KL, Yadav N, Yadav AN, Rastegari AA, Singh C, Negi P, Singh K, Saxena AK (2019) Technologies for biofuel production: current development, challenges, and future prospects. In: Rastegari AA et al (eds) *Prospects of renewable bioprocessing in future energy systems, biofuel and biorefinery technologies*, vol 10. Springer, Cham
- Kumar K, Mella-Herrera RA, Golden JW (2010) Cyanobacterial heterocysts. *Cold Spring Harb Perspect Biol* 2:1–19
- Kumar A, Kumar N, Baredar P, Sukla A (2015) A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renew Sust Energy Rev* 45:530–539
- Kumoro AC, Rianasari D, Pinandita APP, Retnowati DS, Budiyati CS (2012) Preparation of wine from jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) juice using beaker yeast: effect of yeast and initial sugar concentrations. *World Appl Sci J* 16:1262–1268
- Laopaiboon L, Thanonkeo P, Jaisil P, Laopaiboon P (2017) Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by *Saccharomyces cerevisiae*. *World J Microbiol Biotechnol* 23:1497–1501
- Lee WC, Yusof S, Hamid NSA, Baharin BS (2006) Optimizing conditions for enzymatic clarification of banana juice using response surface methodology (RSM). *J Food Eng* 73:55–63
- Leksawasdi N, Joachimsthal EL, Rogers PL (2001) Mathematical modelling of ethanol production from glucose/xylose mixtures by recombinant *Zymomonas mobilis*. *Biotechnol Lett* 23:1087–1093
- Leng TG (2008) Study of the production of ethanol from banana (*Musa spp.*). Unpublished master's thesis, University Malaya, Kuala Lumpur
- Li S, Yang X (2016) Biofuel production from food wastes. In: Luque R, Lin CSK, Wilson K, Clark J (eds) *Handbook of biofuels production*. Woodhead Publishing, Duxford, pp 617–653
- Lin Y, Tanaka S (2006) Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Appl Microbiol Biotechnol* 69:627–642
- Lin Y, Zhang W, Li C, Sakakibara K, Tanaka S, Kong H (2012) Factors affecting ethanol fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* BY4742. *Biomass Bioenergy* 47:395–401
- Lin CSK, Pfaltzgraff LA, Herrero-Davila L, Mubofu EB, Abderrahim S, Clark JH, Koutinas AA, Kopsahelis N, Stamatelatos K, Dickson F, Thankappan S, Mohamed Z, Brocklesby R, Luque R (2013) Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energy Environ Sci* 6:426–464
- Lohrasbi M, Pourbafrani M, Niklasson C, Taherzadeh MJ (2010) Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresour Technol* 101:7382–7388
- Luque R, Clark JH (2013) Valorisation of food residues: waste to wealth using green chemical technologies. *Sustain Chem Process* 1:10

- Ma H, Wang Q, Qian D, Gong L, Zhang W (2009) The utilization of acid-tolerant bacteria on ethanol production from kitchen garbage. *Renew Energy* 34:1466–1470
- Mahdavi M, Abedini E, Hosein Darabi A (2015) Biodiesel synthesis from oleic acid by nanocatalyst (ZrO₂/Al₂O₃) under high voltage conditions. *RSC Adv* 5:55027–55032
- Maheep K (2014) Harvesting of valuable eno- and exo-metabolites form cyanobacteria: a potential source. *Asian J Pharm Clin Res* 7:24–28
- Maina S, Kachrimanidou V, Koutinas A (2017) A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. *Curr Opin Green Sustain Chem* 8:18–23
- Marín FR, Soler-rivas C, Benavente-García O, Castillo J, Pérez-Alvarez J, Benavente-Garcia O, Castillo J, Pérez-Alvarez JA (2007) By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food Chem* 100:736–741
- Martín MA, Siles JA, El Bari H, Chica AF, Martín A (2010) Orange peel: organic waste or energetic resource. *Technol Syst Differ Manure Org Waste Treat Opt* 1:25–28
- Matsakas L, Kekos D, Loizidou M, Christakopoulos P (2014) Utilization of household food waste for the production of ethanol at high dry material content. *Biotechnol Biofuels* 7:4
- Melikoglu M, Lin CSK, Webb C (2013) Analysing global food waste problem: pinpointing the facts and estimating the energy content. *Cent Eur J Eng* 3:157–164
- Mohammadi Moghaddam T, Razavi SMA, Malekzadegan F, Shaker A (2009) Physico-chemical and sensory properties of pistachio green hull's marmalade. *J Food Sci Technol* 6:1–10
- Mohd Azhar SH, Abdulla R, Jambo SA, Marbawi H, Gansau JA, Mohd Faik AA, Rodrigues KF (2017) Yeasts in sustainable bioethanol production: a review. *Biochem Biophys Rep* 10:52–61
- Mohr A, Raman S (2013) Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels. *Energ Policy* 63:114–122
- Morales S, Miranda R, Bustos D, Cazares T, Tran H (2014) Solar biomass pyrolysis for the production of bio-fuels and chemical commodities. *J Anal Appl Pyrolysis* 109:65–78
- Muth MK, Birney C, Cuéllar A, Finn SM, Freeman M, Galloway JN, Zoubek S (2019) A systems approach to assessing environmental and economic effects of food loss and waste interventions in the United States. *Sci Total Environ* 685:1240–1254
- Muttamara S, Visvanathan C, Alwis KU (1994) Solid waste recycling and reuse in Bangkok. *Waste Manage Res* 12:151–163
- Oberoi HS, Vadlani PV, Madl RL, Saida L, Abeykoon JP (2010) Ethanol production from orange peels: two-stage hydrolysis and fermentation studies using optimized parameters through experimental design. *J Agric Food Chem* 58:3422–3429
- Oliveira MF, Saczk AA, Okumura LL, Stradiotto NR (2002) Determination of zinc in fuel alcohol by anodic stripping voltammetry. *Eclética Quím* 27:153–160
- Onwuka CFI, Adetiloye PO, Afolami CA (1997) Use of household wastes and crop residues in small ruminant feeding in Nigeria. *Small Ruminant Res* 24:233–237
- Owen P (1991) *Fermentation biotechnology*. Wiley, New York
- Pervez S, Aman A, Iqbal S, Siddiqui NN, Qader SAU (2014) Saccharification and liquefaction of cassava starch: an alternative source for the production of bioethanol using amylolytic enzymes by double fermentation process. *BMC Biotechnol* 14:49

- Peters B (2011) Prediction of pyrolysis of pistachio shells based on its components hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel Process Technol* 92:1993–1998
- Pham TPT, Kaushik R, Parshetti GK, Mahmood R, Balasubramanian R (2015) Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions. *Waste Manag* 38:399–408
- Pimentel D, Patzek TW (2005) Ethanol production using corn, switch-grass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Nat Resour Res* 14:65–76
- Plazzotta S, Manzocco L, Nicoli MC (2017) Fruit and vegetable waste management and the challenge of fresh-cut salad. *Trends Food Sci Technol* 63:51–59
- Pleissner D, Kwan TH, Lin CSK (2014) Fungal hydrolysis in submerged fermentation for food waste treatment and fermentation feedstock preparation. *Bioresour Technol* 158:48–54
- Pourbafrani M, Forgács G, Sárvári I, Niklasson C, Horváth IS, Niklasson C, Taherzadeh MJ (2010) Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresour Technol* 108:51
- Pramanik K, Rao DE (2005) Kinetic study on ethanol fermentation of grape waste using *Saccharomyces cerevisiae* yeast isolated from toddy. *Inst Eng India J* 85:53–58
- Prasad S, Singh A, Joshi H (2007) Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. *Resour Conserv Recycl* 50:1–39
- Prior BA, Potgieter HJ (1981) Composition of fruit and vegetables processing wastes. *Water Sanit* 7:245
- Promon SK (2015) Ethanol production using vegetable peels medium and the effective role of cellulolytic bacterial (*Bacillus subtilis*) pre-treatment. BRAC University, Dhaka
- Puttongsiri T, Choosakul N, Sakulwilaingam D (2012) Moisture content and physical properties of instant mashed potato. In: International conference on nutrition and food science, vol 39. IACSIT Press, Singapore
- Reddy LVA, Reddy OVS (2005) Production and characterization of wine from mango fruit (L.). *World J Microbiol Biotechnol* 21:1345–1350
- Ritslaid K, Kuut A, Olt J (2010) State of the art in bioethanol production. *Agron Res* 8:236–254
- Robak K, Balcerek M (2018) Review of second generation bioethanol production from residual biomass. *Food Technol Biotechnol* 56:174
- Roda A, De Faveri DM, Giacosa S, Dordori R, Lambri M (2016) Effect of pre-treatments on the saccharification of pineapple waste as a potential source for vinegar production. *J Clean Prod* 112:4477–4484
- Ruiz B, Flotats X (2014) Citrus essential oils and their influence on the anaerobic digestion process: an overview. *Waste Manag* 34:2063–2079
- Saint' Pierre TD, Maranhão TDA, Frescura VLA, Curtius AJ (2005) The development of a method for the determination of trace elements in fuel alcohol by electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry using external calibration. *Spectrochim Acta B* 60:605–613
- Sánchez JO, Cardona CA (2008) Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresour Technol* 99:5270–5295

- Sarkar D, Gupta K, Poddar K, Biswas R, Sarkar A (2019) Direct conversion of fruit waste to ethanol using marine bacterial strain *Citrobacter* sp. E4. *Process Saf Environ* 128:203–210
- Satish B (2010) Ethanol production from spoiled starch rich vegetables by sequential batch fermentation. *Int J Biotechnol Biochem* 3:351
- Sequeira CAC, Brito PSD, Mota AF, Carvalho JL, Rodrigues LFFTTG, Santos DMF, Barrio DB, Justo DM (2007) Fermentation, gasification and pyrolysis of carbonaceous residues towards usage in fuel cells. *Energy Convers Manag* 48:2203–2220
- Shanmugapriya K, Saravana PS, Krishnapriya MM, Mythili A, Joseph S (2012) Isolation, screening and partial purification of cellulase from cellulase producing bacteria. *Int J Adv Biotechnol Res* 3:509–514
- Sharma SK, Kalra KL, Kocher GS (2004) Fermentation of enzymatic hydrolysate of sunflower hulls for ethanol production and its scale up. *Biomass Bioenergy* 27:399–402
- Sharma A, Pareek V, Zhang D (2015) Biomass pyrolysis—a review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renew Sust Energ Rev* 2015(50):1081–1096
- Sheldon RA (2018) Enzymatic conversion of first-and second-generation sugars. In: *Biomass and green chemistry*. Springer, Cham, pp 169–189
- Singh A, Kuila A, Adak S, Bishai M, Banerjee R (2012) Utilization of vegetable wastes for bioenergy generation. *Agric Res* 1:213–222
- Sirkar A, Das R, Chowdhury S, Sahu SJ (2008) An experimental study and mathematical modelling of ethanol production from banana peels by hydrolysis and fermentation. *Inst Eng India J* 88:4–10
- Snehal RP, Gaurav AZ (2017) Production of biofuel from banana waste. *Int J Innov Res Sci Eng Technol* 6:551–554
- Soleimani M, Kaghazchi T (2014) Low-cost adsorbents from agricultural by-products impregnated with phosphoric acid. *Adv Chem Eng Res* 3:34–41
- Suganthi R, Benazir JF, Santhi R, Ramesh Kumar V, Hari A, Meenakshi N, Nidhiya KA, Kavitha G, Lakshmi R (2011) Amylase production by *Aspergillus niger* under solid state fermentation using agroindustrial wastes. *Int J Eng Sci Technol* 3:1756–1763
- Sulaiman A, Othman N, Baharuddin AS, Mokhtar MN, Tabatabaei M (2014) Enhancing the halal food industry by utilizing food wastes to produce value-added bioproducts. *Proc Soc Behav Sci* 121:35–43
- Supriyanto A, Lestari I, Citrasari N, Putri SS (2019) The bioconversion of vegetable waste extract from Osowilangun Central Market Surabaya into bioethanol using *Saccharomyces cerevisiae*. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 245:012042
- Swain MR, Krishnan C (2015) Improved conversion of rice straw to ethanol and xylitol by combination of moderate temperature ammonia pretreatment and sequential fermentation using *Candida tropicalis*. *Ind Crop Prod* 77:1039–1046
- Taghizadeh-Alisaraei A, Hosseini SH, Ghobadian B, Motevali A (2017a) Biofuel production from citrus wastes: a feasibility study in Iran. *Renew Sust Energy Rev* 69:1100–1112
- Taghizadeh-Alisaraei A, Assar HA, Ghobadian B, Motevali A (2017b) Potential of biofuel production from pistachio waste in Iran. *Renew Sust Energy Rev* 72:510–522
- Taherzadeh MJ, Karimi K (2007) Acid based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *Bioresources* 2:472–499

- Thatoi H, Dash PK, Mohapatra S, Swain MR (2014) Bioethanol production from tuber crops using fermentation technology: a review. *Int J Sustain Energy* 35:443–468
- Tomaino A, Martorana M, Arcoraci T, Monteleone D, Giovinazzo C, Saija A (2010) Antioxidant activity and phenolic profile of pistachio (*Pistacia vera* L., variety Bronte) seeds and skins. *Biochimie* 92:1115–1122
- Torija MJ, Rozes N, Poblet M, Guillamon JM, Mas A (2003) Effects of fermentation temperature on the strain population of *Saccharomyces cerevisiae*. *Int J Food Microbiol* 80:47–53
- Triwahyuni E, Sudiyani Y, Abimanyu H (2015) The effect of substrate loading on simultaneous saccharification and fermentation process for bioethanol production from oil palm empty fruit bunches. *Energy Procedia* 68:138–146
- Uçkun Kiran E, Liu Y (2015) Bioethanol production from mixed food waste by an effective enzymatic pretreatment. *Fuel* 159:463–469
- Uçkun E, Liu Y, Kiran EU, Liu Y (2015) Bioethanol production from mixed food waste by an effective enzymatic pretreatment. *Fuel* 159:463–469
- Umamaheswari M, Jayakumari M, Maheswari K, Subashree M, Mala P, Sevanti T (2010) Bioethanol production from cellulosic materials. *Asian J Sci Technol* 1:005–011
- Uncu ON, Cekmecelioglu D (2011) Cost-effective approach to ethanol production and optimization by response surface methodology. *Waste Manag* 31:636–643
- Voloshin RA, Kreslavski VD, Zharmukhamedov SK, Bedbenov VS, Ramakrishna S, Allakhverdiev SI (2015) Photoelectrochemical cells based on photosynthetic systems: a review. *Biofuel Res J* 6:227–235
- Wang LS, Ge XY, Zhang WG (2007) Improvement of ethanol yield from raw corn flour by *Rhizopus* sp. *World J Microbiol Biotechnol* 23:461–465
- Widmer W, Zhou W, Grohmann K (2010) Pretreatment effects on orange processing waste for making ethanol by simultaneous saccharification and fermentation. *Bioresour Technol* 101: 5242–5249
- Will FK, Bauckhage K, Dietrich H (2000) Apple pomace liquefaction with pectinases and cellulases: analytical data of the corresponding juices. *Eur Food Res Technol* 211:291–297
- Williams RB (2009) The technology of waste, biofuels and global warming in viable closed loop, sustainable operations. *Energies* 2:1192–1200
- Wong YC, Sanggari V (2014) Bioethanol production from sugarcane bagasse using fermentation process. *Orient J Chem* 30:507–513
- Wu B, Zhang X, Xu Y, Bao D, Zhang S (2015) Assessment of the energy consumption of the biogas upgrading process with pressure swing adsorption using novel adsorbents. *J Clean Prod* 101: 251–261
- Wu Y, Wang C, Zheng M, Zuo J, Wu J, Wang K, Yang B (2016) Effect of pH on ethanol-type acidogenic fermentation of fruit and vegetable waste. *Waste Manag* 60:158–163
- Yan S, Chen X, Wu J, Wang P (2013) Pilot scale production of fuel ethanol from concentrated food waste hydrolysates using *Saccharomyces cerevisiae* H058. *Bioprocess Biosyst Eng* 36:937–946

- Yanai T, Dev S, Han X, Zheng M, Tjong J (2015) Impact of fuelling techniques on neat n-butanol combustion and emissions in a compression ignition engine. *SAE Int J Engines* 8:735–746
- Yang X, Lee SJ, Yoo HY, Shin HY, Thapa LP, Park C, Kim SW (2014) Production of bioethanol and biodiesel using instant noodle waste. *Bioprocess Biosyst Eng* 37:1627–1635
- Yang S, Fei Q, Zhang Y, Contreras LM, Utturkar SM, Brown SD, Himmel ME, Zhang M (2016) *Zymomonas mobilis* as a model system for production of biofuels and biochemicals. *Microb Biotechnol* 9:699–717
- Yue D, You F, Snyder SW (2014) Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: overview, key issues and challenges. *Comp Chem Eng* 66:36–56
- Yukesh Kannah R, Sivashanmugham P, Kavitha S, Rajesh Banu J (2020) Valorization of food waste for bioethanol and biobutanol production. In: Food waste to valuable resources, applications and management. Elsevier, Amsterdam, pp 39–73
- Zabed H, Faruq G, Sahu JN, Azirun MS, Hashim RA, Boyce N (2014) Bioethanol production from fermentable sugar juice. *Sci World J* 2014:1–11
- Zabed H, Faruq G, Sahu J, Boyce A, Ganesan P (2016) A comparative study on normal and high sugary corn genotypes for evaluating enzyme consumption during dry-grind ethanol production. *Chem Eng J* 287:691–703
- Zhang P, Whistler RL, BeMiller JN, Hamaker BR (2005) Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility a review. *Carbohydr Polym* 59(443):458
- Zhao XQ, Zi LH, Bai FW, Lin HL, Hao XM, Yue GJ, Ho NW (2011) Bioethanol from lignocellulosic biomass. In: *Biotechnology in China III: biofuels and bioenergy*. Springer, Berlin, pp 25–51
- Zhou W, Widmer W, Grohmann K (2008) Developments in ethanol production from citrus peel waste. In: *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, pp 307–310

از پسماند میوه و سبزیجات تا تولید سوخت زیستی: بخش دوم

چکیده: دفع پسماند غذایی یکی از بزرگترین چالش‌های عصر حاضر است. بسیاری از شیوه‌های مدیریت مواد غذایی از روش‌های سنتی تا جدید در حال استفاده هستند. روش‌های سنتی دفع پسماندهای غذایی شامل سوزاندن، دفن زباله در محل دفن زباله، کمپوست سازی و تهیه خوراک دام است. تلبارکردن پسماند مواد غذایی در محل‌های دفن زباله و سوزاندن آنها روش‌های مناسبی نیستند؛ زیرا هوا، آب و خاک را آلوده می‌کنند. پسماند غذایی منابع غنی کربوهیدرات‌ها، چربیها، پروتئین‌ها و همچنین لیگنین در نسبت‌های مختلف هستند. ارزش گذاری مواد غذایی به شیوه ای موثر و سازگار با محیط زیست می‌تواند با تبدیل پسماند غذایی به سوخت‌های زیستی انجام شود. پسماندهای غذایی می‌توانند از طریق واکنش‌های چندمرحله‌ای شیمی-کاتالیتیک، شیمی-انزیمی و چندمرحله‌ای انزیمی به سوخت‌های زیستی تبدیل شود. محققان در سراسر جهان از انواع مختلف پسماندهای غذایی به عنوان ماده‌ای اولیه برای تولید سوخت زیستی استفاده می‌کنند. پسماندهای میوه و سبزیجات از بازارها، هتل‌ها، خانه‌ها، مراکز آبمیوه فروشی و موارد مشابه جمع‌آوری می‌شوند؛ و به عنوان ماده اولیه برای تخمیر (تجزیه بی‌هوازی) به منظور تولید سوخت‌های زیستی استفاده می‌شوند. سوخت‌های زیستی که معمولاً از پسماند میوه‌ها و سبزیجات تولید می‌شوند، بیواتانول، هیدروژن زیستی، بیوگاز، بیودیزل و روغن‌های زیستی هستند.

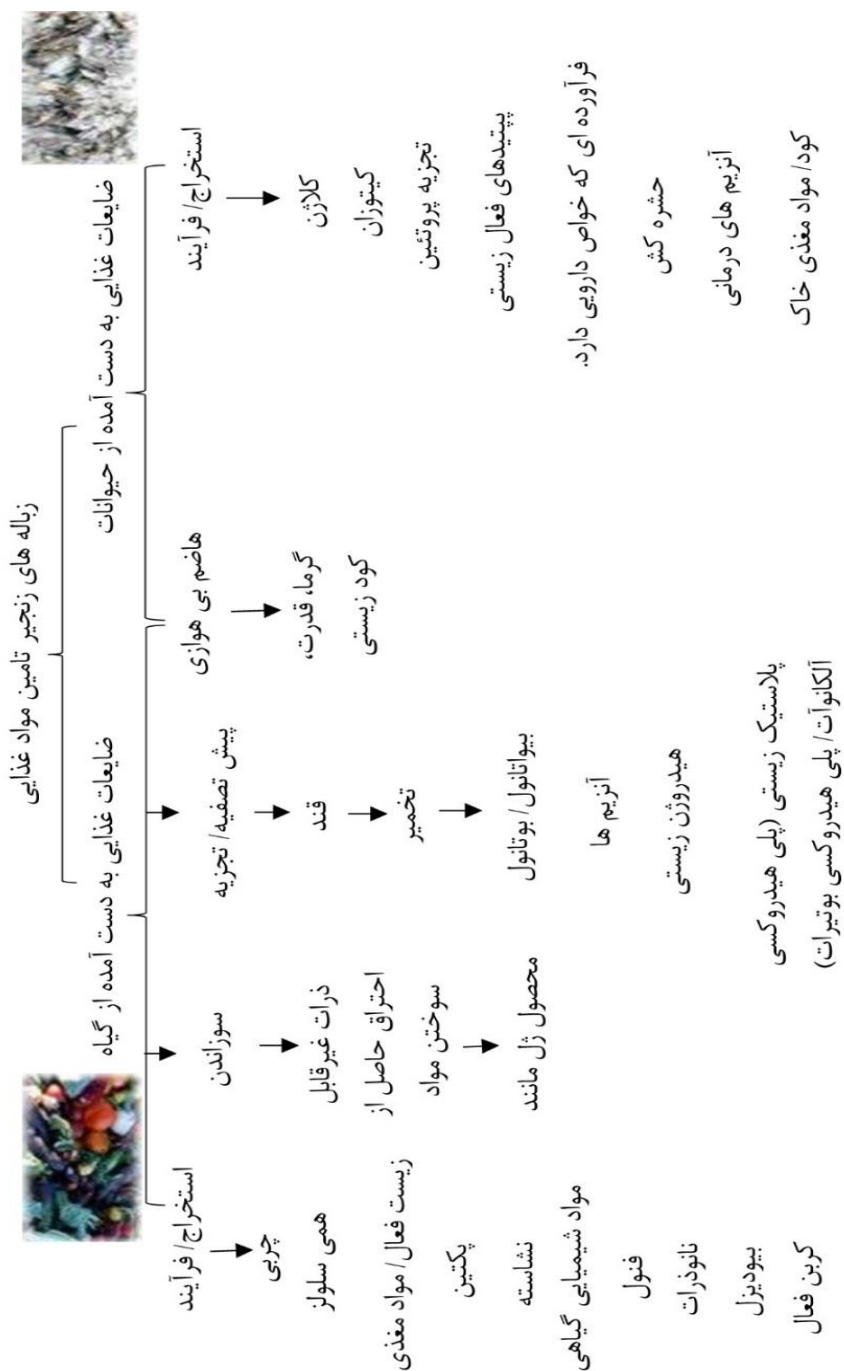
واژه‌های کلیدی: پسماند میوه و سبزیجات، سوخت زیستی، هیدروژن زیستی، بیودیزل، بیوگاز

اختصارات

CCW	آب پنیر خام
COD	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی
FSC	زنجیره تامین مواد غذایی
FVW	پسماند میوه و سبزیجات
FW	زباله‌های مواد غذایی
FWS	پسماند آب میوه
GHG	گاز گلخانه ای
HRT	زمان ماند هیدرولیک
KVW	زباله‌های سبزیجات آشپزخانه
OLR	نرخ بارگذاری آلی
SM	کود دامی
TS	جامد کل
VFA	اسیدهای چرب فرار
VS	جامدات فرار

۴-۱ مقدمه

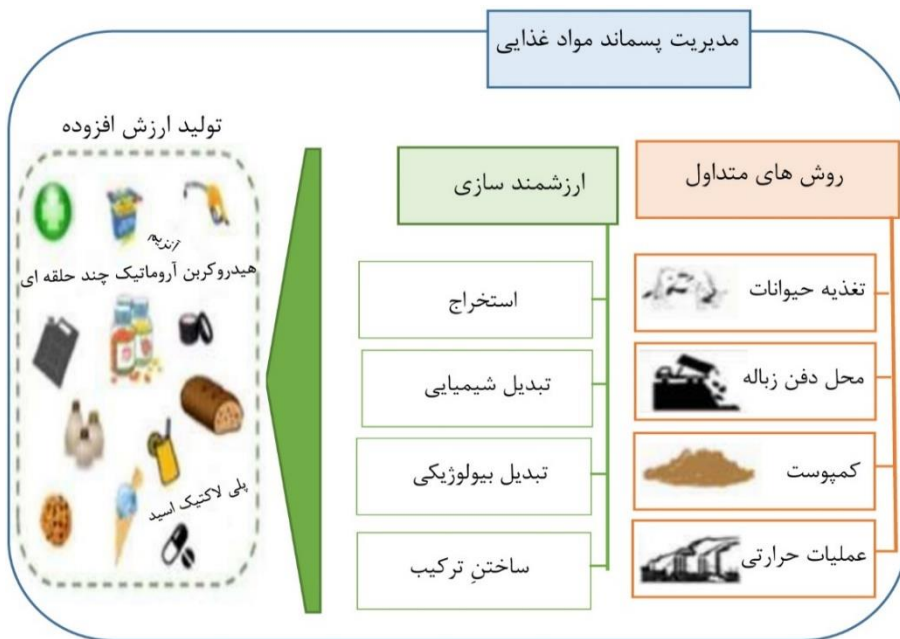
ایمنی مواد غذایی و روش‌های مناسب مدیریت پسماند، چالش‌های اصلی قرن بیست و یکم هستند؛ زیرا اکثر پسماند مواد غذایی در محل‌های دفن زباله تلنبار می‌شوند. باقی مانده‌های تولید شده توسط زنجیره تامین مواد غذایی سرشار از مواد مغذی با ارزش هستند؛ اما دفع آنها تهدیدی برای محیط زیست است (Gustavsson et al. 2011). پسماندهای غذایی را می‌توان بر اساس منشأ آن‌ها به دو دسته تقسیم کرد: پسماندهای سبزیجات و پسماندهای حیوانی. پسماندهای سبزیجات از گیاه بوته ای، غلات، حبوبات، میوه‌ها و سبزیجات، محصولات روغنی و غده‌ها به وجود می‌آیند؛ اما پسماندهای حیوانی از صنایع گوشت، شایلات و غذاهای دریایی و صنایع لبنی به دست می‌آیند (Galanakis 2012). هر دو پسماندهای گیاهی و حیوانی غنی از کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها، ترکیبات فعال بیولوژیک و پروتئین‌ها هستند (Kosseva 2009). کاهش میزان پسماندهای غذایی فاسد به منظور استخراج مواد ارزشمند می‌تواند ظرفیت زنجیره تأمین غذا را افزایش دهند؛ و در نتیجه می‌تواند بهبود در شیوه‌های تامین امنیت غذایی داشته باشد. پسماند میوه و سبزیجات می‌توانند به عنوان جایگزینی برای تولید محصولات مفید عمل کنند؛ زیرا ارزان و به راحتی در دسترس هستند (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱. مواد حاصل از زنجیره تامین مواد غذایی (برگرفته از Ravindran and Jaiswal 2016)

در روش‌های مدیریت پسماند غذایی، از تبدیل شیمیایی یا زیستی مواد آلی پسماند غذایی به مولکول‌های ساده‌تر مانند آب، دی اکسید کربن، متان، آمونیاک، هیدروژن سولفید، هیدروژن و مونواکسید کربن استفاده می‌شود. این شیوه‌های مدیریت مواد غذایی گاهی اوقات تهدیدی برای محیط زیست هستند؛ زیرا گازهای گلخانه‌ای را در هوا آزاد می‌کنند؛ و آب و خاک را آلوده می‌کنند (Papargyropoulou et al. 2014). به نظر می‌رسد روش‌های تبدیل پسماند به سوخت زیستی نسبت به شیوه‌های مدیریت مواد غذایی متداول، سودمندتر هستند؛ زیرا آنها با تبدیل پسماند مواد غذایی به محصولات مفید، میزان پسماند را کاهش می‌دهند؛ یا مواد مغذی را در زنجیره تامین مواد غذایی فراهم می‌کنند. پسماند غذایی ناشی از صنایع فرآوری غذا، بدون بازیافت و با دورریختن، به عنوان بقایای فرایند تولید غذا از فرایند تولید غذا محسوب می‌شوند. صنایع غذایی هر روز نسبت به دفع بی‌شماری پسماند غذایی اقدام می‌کنند؛ و بر اساس برآوردها، یک سوم مواد غذایی تولید شده برای مصرف انسان بدون مصرف دور ریخته می‌شود (Gustavsson et al. 2013). در کشورهای پیشرفته، پسماند مواد غذایی از مصرف کنندگانی به وجود می‌آید که مقدار زیادی مواد غذایی خریداری کردند؛ و آنها را بدون مصرف دور می‌اندازند. در کشورهای در حال توسعه، روش‌های نامناسب برداشت، مکان‌های ذخیره‌سازی و روش‌های بسته‌بندی و فرآوری نیز باعث دفع بالای پسماند غذایی می‌شود (Zorya et al. 2011). پسماند غذایی، منجر به ضرر ارزش مالی شده و بر اثر استفاده بیش از حد از منابعی نظیر بذرهای، آب، انرژی، نیروی کار، کودها و سموم کشاورزی در فرایند تولید غذا، بر تغییرات آب و هوا تأثیر می‌گذارند.

ممنوعیت اتلاف غذا و تغذیه نیازمندان از غذاهای منقضی نشده می‌تواند تا حدودی مشکل هدررفت غذا را حل کند (Lin et al. 2013). با این حال، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰، تولید مواد غذایی به ۶۰ درصد افزایش یابد؛ تا جمعیت کل جهان را پوشش دهد. مقادیر پروتئین و قند پسماند مواد غذایی را می‌توان به قندهای قابل تخمیر آسان و همچنین اسیدهای آمینه تجزیه کرد (Pleissner et al. 2014). میکروب‌ها می‌توانند از پسماند غذایی به عنوان ماده اولیه استفاده کنند؛ بنابراین می‌توانند آنها را به محصولات مفید مانند سوخت‌های زیستی، مواد شیمیایی ضروری، آنزیم‌ها و مواد تبدیل کنند (Zhang et al. 2013a, b; He et al. 2012). تبدیل زیست توده پسماند غذایی به سوخت‌های زیستی می‌تواند در تولید برق و علاوه بر این در تهیه خوراک دام استفاده شود (Lin et al. 2013). ارزش گذاری پسماند غذایی به سوخت‌های زیستی می‌تواند از وابستگی انسان به سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر و نفت خام جلوگیری کند. پسماند مواد غذایی را می‌توان به سوخت‌های زیستی به عنوان مثال: اتانول زیستی، هیدروژن زیستی، بیودیزل، نفت زیستی، و بیوگاز تبدیل کرد (Tuck et al. 2012) (شکل ۲-۴، جدول ۴-۱).



شکل ۴-۲. شیوه‌های مدیریت پسماند مواد غذایی (برگرفته از Esparza et al. 2020)

جدول ۴-۱. مزایا و معایب تبدیل زباله‌های غذایی به سوخت‌های زیستی مایع برگرفته از (Karmee 2016)

مزایا	معایب	نظرات
* استفاده مفید از ضایعات مواد غذایی. * جایگزینی برای سوخت فسیلی * امنیت انرژی و وابستگی کمتر به کشورهای بی ثبات سیاسی خاورمیانه. * محدودیت‌ها و مشکلات مکانی (مانند آلودگی هوا و وابستگی به نفت) در مناطق شهری قابل برطرف شدن هستند * کارخانه‌های کوچک سوخت زیستی را می‌توان در نزدیکی مراکز مواد غذایی راه اندازی کرد.	* هزینه عملیاتی بالا. * هیچ روش مقرون به صرفه‌ای تاکنون دردسترس نیست: به ویژه برای ضایعات مواد غذایی مخلوط. * برای مقابله با ماهیت متنوع ضایعات مواد غذایی باید روش‌های مفید، پیشرفته، و اقتصادی ایجاد شود. * بیشتر تحقیقات در حال انجام در مراحل مقدماتی هستند.	* بیشترین روش‌ها شامل فرآیندهای شیمیایی و بیوشیمیایی هستند. * فناوری برای تخمین ارزش ضایعات مواد غذایی مخلوط نسبتاً پیچیده است. * واکنش‌های متوالی کاتالیزوری را می‌توان به عنوان یک فناوری جایگزین امتحان کرد * برای استخراج چربیها، می‌توان از حلال‌های سبز مانند دی‌اکسید کربن استفاده کرد

۴-۲ هیدروژن زیستی

هیدروژن به عنوان یک سوخت تمیز، سازگار با محیط زیست و امیدوارکننده در آینده پذیرفته شده است. تولید هیدروژن از مواد زائد با روش‌های بیولوژیکی، امکان‌پذیر بوده؛ زیرا به تولید انرژی زیستی کمک می‌کند. تولید هیدروژن زیستی، فرآیندی است که توسط میکروب‌ها کنترل می‌شود؛ و در آن باکتری‌ها با کمک آنزیم‌ها مانند نیتروژناز و هیدروژناز، در تخمیر نوری یا تخمیر تاریک، در فرآیند تولید هیدروژن مشارکت می‌کنند. تولید هیدروژن زیستی را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: (۱) بیوفوتولیز آب با جلبک یا سیانوباکتری در حضور نور خورشید، (۲) تجزیه نوری ترکیب آلی توسط باکتری‌های فتوسنتزی و نور، (۳) تولید هیدروژن با تخمیر و تبدیل مواد اولیه غنی از کربوهیدرات همراه با محصولات ضروری مانند الکل‌ها و اسیدها با فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی و (۴) ترکیبی از تخمیر نوری و تخمیر تاریک (Kothari et al. 2012). در میان این روش‌ها، تخمیر تاریک فناوری امیدوارکننده‌تری به نظر می‌رسد که می‌تواند در مقیاس تجاری مورد استفاده قرار گیرد؛ زیرا به نور خارجی و مکمل انرژی نیاز نیست؛ نسبتاً مقرون به صرفه است (Sreela et al. 2011). در طی تخمیر تاریک، گلوکز به اسید استیک و همچنین هیدروژن در نسبت ۱:۲ تبدیل می‌شود. علاوه بر این، این روش در ترکیب و استفاده تولید هیدروژن زیستی و در آماده‌سازی سلول سوختی میکروبی نیز مفید باشد (Kim et al. 2011a). اکثر مطالعات بر روی تولید هیدروژن زیستی با استفاده از زیست توده زباله با استفاده از روش تخمیر تاریک انجام شده است (Yasin et al. 2011).

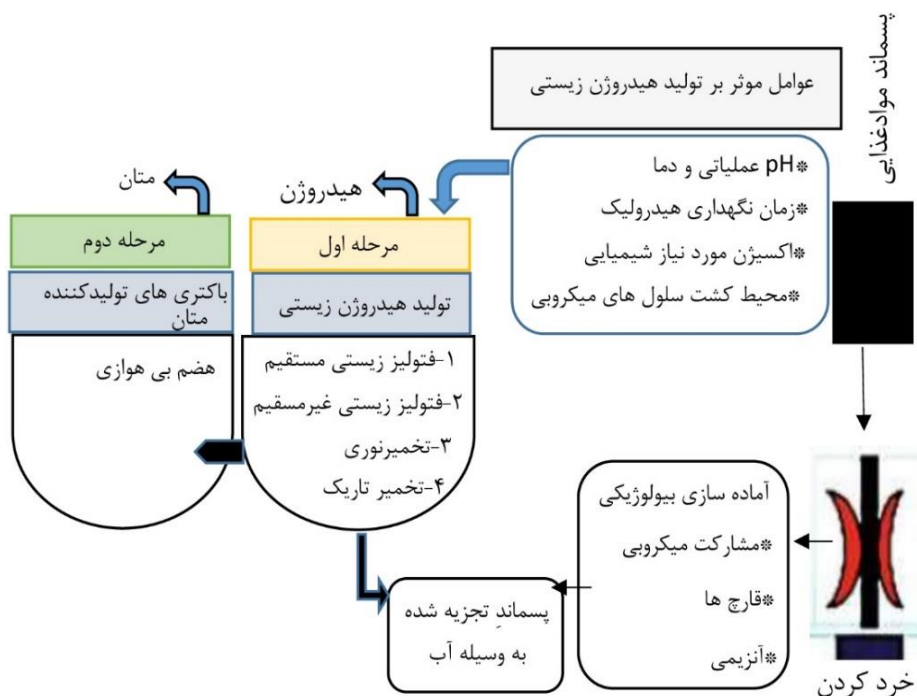
عنصر اصلی پسماندهای جامد شهری از پسماندهای مواد غذایی تشکیل شده است (Sreela-or et al. 2011). پسماند غذایی نه تنها شامل غذای پخته شده، بلکه مواد غذایی خامی است که قبل یا در حین فرآوری مواد غذایی دور ریخته می‌شود. پسماند غذایی سرشار از رطوبت، نمک و مواد جامد فرار هستند؛ و تجزیه این اجزا نه تنها خاک، بلکه آب‌های زیرزمینی را نیز آلوده می‌کند؛ و همچنین گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌کند (Lee and Chung 2010). طبق گزارش ژانگ و همکاران (2007)، پسماند غذایی جز اصلی پسماند در ایالات متحده است. به‌طور مشابه، دورریختن مواد غذایی تاریخ مصرف گذشته در مالزی در سال‌های اخیر دو برابر شده است؛ و ۵۰ درصد از پسماند غذایی از آشپزخانه‌ها به‌دست می‌آید. در دهه گذشته، تولید انرژی زیستی از پسماند غذایی به‌ویژه به‌صورت تولید هیدروژن زیستی، مورد توجه قرار گرفته است (Yasin et al. 2011). انواع مختلفی از پسماند به دست آمده از صنایع فرآوری مواد غذایی، به عنوان مثال: آب پنیر، باقی مانده پنیر سوپا، تقاله سیب، آب برنج و ... برای تولید هیدروژن زیستی آزمایش شده است (Doi et al. 2010). مواد زائد جامد شهری (پسماند

میوه و سبزیجات)، پوست میوه‌ای از تیره انجیرها، و نشاسته گندم نیز قابلیت استفاده برای تولید هیدروژن زیستی را دارند. از آنجایی که پسماند مواد غذایی سرشار از سلولز، کربوهیدرات، همی سلولز و چربی هستند؛ مسیرهای متابولیکی مختلفی برای تولید هیدروژن زیستی دنبال می‌شود. جزئیات این مسیرها هنوز چندان روشن نیست (Vijayaraghavan et al. 2006). تولید هیدروژن زیستی از ماده‌های غذایی غنی از کربوهیدرات از طریق مراحل اسیدسازی و استوژن^۱ دنبال می‌شود؛ اما این فرآیندها به عوامل زیست محیطی مانند دما، pH، فشار جزئی هیدروژن، اسیدهای چرب فرار، غلظت پسماند غذایی و منشاء میکروبی حساس هستند. افزایش تقاضای انرژی در سراسر جهان یک چالش بزرگ در دوران حاضر است. استفاده از منابع پایدار انرژی مانند پسماند میوه و سبزیجات و پسماند صنایع فرآوری غذا برای تولید هیدروژن زیستی، می‌تواند به عنوان یک راهکار برای مقابله با این چالش و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرد.

پسماند مواد غذایی و پسماند صنایع تبدیلی مواد غذایی برای تولید هیدروژن زیستی توسط یاسین و همکاران آزمایش شدند (2013). آنها تعدادی از پارامترهای فیزیکوشیمیایی را پیدا کردند. این پارامترها بر تولید هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارند. تجزیه بی‌هوازی پسماند غذایی برای تولید انرژی مناسب است؛ زیرا دارای غلظت مواد اولیه بالا، نسبت کربن به نیتروژن بالا و رطوبت مناسب است. برای تولید هیدروژن زیستی با یک سیستم هضم بی‌هوازی، خواص فیزیکوشیمیایی پسماند مواد غذایی اهمیت بسیاری دارند. تولید و بازده هیدروژن زیستی بسیار به آماده‌سازی پسماند غذایی، pH، فشار جزئی هیدروژن پایین و دما بستگی دارد (Kim et al. 2009). مقادیر مواد مغذی، مقادیر جامدات فرار و اندازه ذرات عوامل دیگری هستند که بر تولید هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارند (Zhang et al. 2007) (شکل ۴-۳). محققان در سراسر جهان تأثیر ترکیب ماده اولیه و نوع پسماند تولید شده توسط کافی شاپ‌ها بر تولید هیدروژن زیستی را مورد بررسی قرار داده‌اند. به طور کلی، برای دستیابی به غلظت مناسب ماده اولیه، مواد خام اولیه با آب خمیر می‌شوند که باعث تجزیه شدن و در نتیجه تأثیر بر عملکرد تولید هیدروژن زیستی می‌شود. اسماعیل و همکاران (2009) دریافتند که با کنترل اکسیژن مورد نیاز شیمیایی حداکثر بازده هیدروژن زیستی را می‌توان به دست آورد. با این حال، موهان و همکاران (2009) گزارش کردند که برای تولید موثر هیدروژن زیستی با تخمیر بی‌هوازی، نسبت کربن به نیتروژن بالا مهم است؛ اما نسبت کربن به نیتروژن بالاتر از ۲۰ باعث کاهش عملکرد می‌شود. بنابراین برای بازده هیدروژن زیستی بالا، نسبت کربن به

۱. فرآیندی که در آن ارگانیزم‌ها می‌توانند استات را به عنوان محصول نهایی تولید کنند.

نیتروژن پسماند غذایی باید بین ۲۰ تا ۲۱ باشد. محققان تولید هیدروژن زیستی از پسماند مواد غذایی را از طریق روش‌های مختلفی از جمله کود دامی و کمپوست به صورت عملکرد دسته ای، کشت مخلوط از لجن بی‌هوازی و حالت‌های نیمه پیوسته و پیوسته بررسی کرده‌اند. میکروب‌های موجود در پسماند مواد غذایی همراه با مقادیر کربن بالا، برای استفاده به عنوان پیش نیاز برای تولید هیدروژن زیستی با تخمیر بی‌هوازی مناسب می‌کند. تاکنون، استفاده از محیط کشت باکتری خالص برای تولید هیدروژن زیستی از پسماند غذایی گزارش نشده است.



شکل ۳-۴. تبدیل پسماند غذایی به هیدروژن زیستی (برگرفته از Bhurat et al. 2020)

جو و همکاران (2007) برای آزمایش بازده هیدروژن زیستی از پسماند غذایی، از سویه‌ی کلستریدیوم تیروبوتیریوم JM1 (تک سویه) و روش تخمیر بی‌هوازی استفاده کردند؛ اما سایر محققان تلاش کردند با ترکیب پسماند غذا با لجن و انجام فعالیت میکروبی، به بازده بالاتری در تولید هیدروژن زیستی برسند. (Zhu et al. 2008). همچنین، برای افزایش مقادیر پروتئین و حفظ تعادل نسبت کربن به نیتروژن، از مواد دفن زباله استفاده شد (Mohan et al. 2009). رشد و متابولیسم باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن را می‌توان با

افزودن لجن هضم شده به صورت بی هوازی افزایش داد (Kim and Lee 2010). کیم و همکاران (2011d) تأثیر پسماند غذایی غیر استریل بر تولید هیدروژن زیستی بدون افزودن محیط کشت را آزمایش کردند؛ و متوجه شدند عملکرد تولید هیدروژن زیستی در مقایسه با پسماند غذایی که با استفاده از حرارت پیش‌پردازش شده بود، بسیار کم است. زیرا عملیات حرارتی باعث افزایش فعالیت باکتری‌های مصرف‌کننده هیدروژن می‌شود. البشیشی و همکاران (2011a, b) تأثیر دستگاه اولتراسونیک بر پسماند غذایی همراه با عملیات حرارتی و بدون افزودن محیط کشت را آزمایش کردند و متوجه شدند که عملیات حرارتی عاملی ضروری در افزایش عملکرد تولید هیدروژن زیستی است، اما سایر محققان تأثیر غلظت پروتئین، کربوهیدرات، سلولز و چربی بر تولید هیدروژن زیستی را آزمایش کردند. دانکو و همکاران (2008) تأثیر نسبت سلولز، کربوهیدرات، چربی و پروتئین در مخلوط با کلم پیچ، سینه مرغ، تکه‌های سیب‌زمینی و چربی خوک را آزمایش کردند؛ و مشاهده کردند که وقتی لجن دانه‌بندی شده اضافه می‌شود، این نسبت می‌تواند بر عملکرد تولید هیدروژن تأثیر بگذارد. یاسین و همکاران (2011) اثر فیبر، کربوهیدرات و نسبت پروتئین را با مخلوط کردن پسماند رستوران و پسماند مواد غذایی جامد شهری با ماهی، سبزیجات و برنج آزمایش کردند و بازده خوبی از هیدروژن زیستی را به دست آوردند.

صنایع فرآوری غذاهای مختلف مانند پنیر، غلات، پنیرسویا، پوست سیب‌زمینی و سایر موارد، همراه با مقدار زیادی فاضلاب حاوی نشاسته، قند و انواع محصولات پسماندی را تولید می‌کنند. استفاده از این پسماند به منظور تولید هیدروژن زیستی، به این صنایع کمک می‌کند؛ و آن‌ها را قادر می‌سازد از هیدروژن زیستی به عنوان منبع برق استفاده کنند (Van-Ginkel et al. 2005). پوست میوه‌های مخلوط، پسماند آناناس، پوست میوه‌های کاملاً رسیده و تفاله‌های سیب ارزش بازاری ندارند؛ اما سرشار از قند هستند؛ و می‌توانند به عنوان پیش نیاز برای تولید هیدروژن زیستی عمل کنند. کیم و همکاران (2011a, b) بازده هیدروژن زیستی خوبی را از پسماند میوه‌های کاملاً رسیده و فرآوری پسماند پنیرسویا به دست آوردند. فرآوری پسماند پنیرسویا به پیش تصفیه با اسید و حرارت برای افزایش مقادیر کربوهیدرات‌های محلول در خوراک نیاز داشت. پسماند آب پنیر غنی از پروتئین می‌باشد؛ و فاضلاب غلات منابع غنی قند (گلوکز) هستند؛ و استفاده از آنها همچنین می‌تواند منجر به بازده بالا هیدروژن زیستی شود (Castelló et al. 2009). باکتری *کلسترییدیوم ساکاروپروتیلاستونیکوم*^۱ به تنهایی می‌تواند پسماند آب پنیر خام را به هیدروژن زیستی تبدیل

1. *Clostridium saccharoperbutylacetonicum*

کند (Ferchichi et al. 2005). تولید هیدروژن زیستی نیز می‌تواند توسط سلول‌های باکتری کلسترییدیوم از طریق تخمیر انجام شود. مواد آلی باقیمانده در بخش کشاورزی همچنین پساب‌های حاصل از صنایع فراوری غذا به عنوان محیط مناسبی برای تولید هیدروژن زیستی به وسیله تخمیر باکتری کلسترییدیوم عمل می‌کنند. این روش به نظر می‌رسد اقتصادی و در طولانی‌مدت استمرار داشته باشد (Sivagurunathan and Lin 2019). پسماند میوه‌ها زیست تخریب‌پذیر هستند؛ و منابع خوبی از پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی و اسیدهای آمینه هستند. این ترکیبات اجزای اساسی رشد باکتری کلسترییدیوم هستند. همچنین، این ترکیبات در تخمیر منجر به تولید هیدروژن می‌شوند (Abubackar et al. 2019). پسماند میوه در طول سال در دسترس هستند؛ زیرا بخش عمده‌ای بدون مصرف به دلایل مختلف، به عنوان مثال: برداشت ضعیف، حمل و نقل و امکانات ذخیره‌سازی، هدر می‌رود (Sagar et al. 2018). تلبار کردن پسماند میوه در محل‌های دفن زباله به دلیل عوارض متعدد برای محیط زیست مناسب نیست. بنابراین تخمیر این پسماند توسط تخمیر باکتری کلسترییدیوم مشکل را حل نموده و هیدروژن زیستی نیز تولید می‌کند. هیدروژن زیستی یک منبع تجدید پذیر انرژی است (Mandavgane et al. 2017). تعداد بسیار کمی از گونه‌های کلسترییدیایی، به عنوان مثال: کلسترییدیوم پرفرنترنس MTCC116 و همچنین کشت مخلوط کلسترییدیوم باراتی^۱ و کلسترییدیوم پرفرنترنس^۲، برای استفاده بالقوه آنها برای تولید هیدروژن زیستی با استفاده از پسماند میوه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. واضح است که پسماند میوه می‌تواند به عنوان پیش نیاز برای سلول‌های باکتری کلسترییدیوم برای انجام تخمیر عمل کنند. بنابراین نیاز به جستجوی سویه‌های دیگر برای افزایش تولید هیدروژن زیستی وجود دارد. سویه کلسترییدیوم BOH3 آنزیم‌های ساکارولیتیک (زیلاناز، آمیلاز و سلولاز) را به طور طبیعی تولید می‌کند؛ در نتیجه، می‌تواند باقیمانده‌های کشاورزی (کیک روغن کنجد و سبوس برنج) را تخمیر کند که منجر به تولید بوتانول و هیدروژن می‌شود (Turhal et al. 2019). تولید هیدروژن زیستی از تخمیر پسماند میوه توسط سویه کلسترییدیوم BOH3 توسط ماهاتو و همکاران تایید شده است (2020). هضم مرطوب پسماند میوه (میوه‌های مخلوط و پسماند خربزه) توسط تخمیر باکتری کلسترییدیوم منجر به بازده هیدروژن زیستی بالاتر می‌شود (Amekan et al. 2018). در این روش، پسماند میوه در یک محیط پایه بی‌هوازی به صورت شناور قرار می‌گیرند؛ سپس با استفاده از اتوکلاو برای استریل کردن، پردازش می‌شوند. این عمل باعث افزایش مقادیر قند می‌شود. افزایش مقادیر قند باعث رشد بهبود یافته سویه کلسترییدیوم BOH3 می‌شود. این

1. C. baratii
2. C. perfringens

سویه سرعت تخمیر را افزایش داده و بازده هیدروژن زیستی بیشتری نیز به همراه دارد. افزایش غلظت پسماند میوه به حد معین، نه تنها باعث افزایش کل جامدات می‌شود، بلکه تراکم سلولی سویه کلستریدیوم BOH3 را نیز افزایش می‌دهد. این امر منجر به تولید بیشتر هیدروژن زیستی می‌شود. با این حال، پس از این میزان، کاهش رشد سلولی و تولید هیدروژن زیستی مشاهده شده است. این امر را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که افزایش غلظت کل جامدات می‌تواند باعث ایجاد تنش و همچنین کاهش میزان آب مورد نیاز برای فعالیت متابولیکی سلول‌های کلستریدیایی شود. بنابراین رشد سلولی و عملکرد هیدروژن تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Cheng and Zhu 2016). سویه کلستریدیوم BOH3 پس از تخمیر هیدروژن زیستی، اسیدهای بوتیریک و استیک تولید می‌کند. مطالعات نشان داده است که سویه کلستریدیوم BOH3 آنزیم‌های ساکارولیتیک دیگر (سلولاز، آمیلاز، زایلاناز و پکتیناز) را در طی تخمیر پسماند میوه‌های مخلوط تولید می‌کند. این آنزیم‌ها نه تنها تولید هیدروژن زیستی، بلکه اسید بوتیریک، اسید استیک، استون، اتانول و بوتانول را نیز افزایش می‌دهد. استفاده از شیرابه پسماند میوه در تخمیر مستقیم، نسبت به هیدرولیز پسماند میوه جمع آوری شده از تابش مایکروویو و اتوکلاو، منجر به بازده بالاتری در تولید هیدروژن زیستی می‌شود. شیرابه پسماند میوه هنگامی که توسط نوشیدنی‌های الکلی آنزیمی (حاوی مخلوطی از سلولاز، آمیلاز، زایلاناز و پکتیناز) هیدرولیز می‌شود، قادر به استخراج مواد مغذی بزرگ و کوچک از مواد اولیه بسیار بهتر از سایر پیش پردازش‌ها (مایکروویو، اتوکلاو و تخمیر مستقیم) است. شیرابه پسماند میوه که توسط تخمیر مستقیم فرآوری می‌شود، نه تنها رشد سویه کلستریدیوم BOH3 را افزایش می‌دهد، بلکه فعالیت کاتالیزوری آنزیم هیدروژناز $[\text{FeFe}]$ را نیز بالا می‌برد. این آنزیم پس از فعالیت متابولیکی سلول‌های کلستریدیوم، هیدروژن تولید می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که اضافه کردن (Fe^{2+}) به محیط فعالیت هیدروژناز را افزایش می‌دهد. این یون فردوکسین کاهش یافته را اکسید می‌کند؛ و در نتیجه تولید هیدروژن توسط کلستریدیا را افزایش می‌دهد (Dada et al. 2013). شیرابه پسماند میوه که برای هیدرولیز آنزیمی استفاده می‌شود، مقدار بیشتری قندها را در محیط رشد آزاد می‌کند. این قند باعث رشد سلولی بهبود یافته در سویه کلستریدیوم BOH3 می‌شود؛ و در نتیجه باعث افزایش بازده هیدروژن زیستی می‌شود. میکروب‌های رشد یافته در تخمیر شیرابه ممکن است در سطح خاص تنش را تجربه کنند؛ و به همین دلیل، ویژگی‌های فیزیولوژیکی آن‌ها با میکروب‌های رشد یافته در تخمیر شناور متفاوت است (Mthethwa et al. 2018). قبلاً گزارش شده است که نسبت کربن به نیتروژن مواد غذایی نقش مهمی در تولید هیدروژن زیستی توسط تخمیر تاریک ایفا می‌کند؛ و زمانی که نسبت کربن به نیتروژن مواد غذایی بیش از ۳۰ برسد تولید هیدروژن زیستی کاهش

می‌یابد (Sethupathy et al. 2019). نسبت کربن به نیتروژن پسماند میوه کمتر از ۳۰ به رشد سویه کلوستریدیوم BOH3 کمک می‌کند؛ بنابراین بر تولید هیدروژن زیستی نیز تأثیر می‌گذارد. تا کنون، تعداد بسیار کمی از سویه‌های کلوستریدی (کلوستریدیوم پاراپوتریفیکوم m-21، کلوستریدیوم پاستوریانوم MTCC116 و ترموسلوم کلوستریدیوم ATCC 27405) برای تولید هیدروژن زیستی از یک محیط مخلوط با پسماند میوه، تفاله نیشکر و پسماند کیتین به عنوان مواد اولیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. گزارش شده است که سویه کلوستریدیوم پاستوریانوم MTC116 قادر به تولید آنزیم‌های ساکارولیتیک نیست؛ و به همین دلیل از پسماندهای میوه کمترین مقدار هیدروژن زیستی را تولید می‌کند. به علاوه، سویه ترموسلوم کلوستریدیوم ATCC 27405 و کلوستریدیوم پاراپوتریفیکوم M-21 قادر به ترشح آنزیم‌های ساکارولیتیک مانند سلولاز و کایتیناز هستند؛ بنابراین قادرند سطوح مناسبی از هیدروژن زیستی تولید کنند. سویه‌های کلوستریدیوم ATCC 27405 و M-21، همانند سویه کلوستریدیوم BOH3، قادر به تولید آنزیم‌های ساکارولیتیک هستند؛ و به همین دلیل می‌توانند منجر به تولید هیدروژن زیستی شوند. فرآوری زیستی تثبیت شده پسماند میوه، بازده بیشتری از هیدروژن زیستی نسبت به پسماند کیتین و تفاله نیشکر تولید می‌کند. اما سویه کلوستریدیوم BOH3 بازده بالایی از هیدروژن زیستی از زباله‌های میوه و کیتین پردازش شده توسط فرآوری زیستی تثبیت شده را ارائه می‌دهد. این نشان می‌دهد که سویه کلوستریدیوم BOH3 می‌تواند به طور مستقیم پسماند میوه را به انرژی زیستی تبدیل کند. این انرژی زیستی می‌تواند در مقیاس تجاری استفاده شود (Cheng and Zhu 2016).

تخمیر تاریک باعث افزایش بازده بیشتر در تولید هیدروژن زیستی می‌شود؛ زیرا می‌تواند از ماده اولیه پایدار (زباله‌های صنعتی - کشاورزی و فاضلاب) استفاده کند. اکثر مطالعات با استفاده از هاضم تک ماده‌ای از موادی مانند پساب صنایع الکل سازی، پسماند غذایی، باقیمانده‌های استخراج روغن سویا، گیاه سنبل آبی، فاضلاب صنایع تولید پنیر و پسماند قارچ انجام شده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داده است که بازده هیدروژن زیستی ممکن است به دلیل مصرف هیدروژن توسط جوامع میکروبی، تولید متان، عدم تعادل مواد مغذی یا کاهش توانایی فاضلاب در تحمل تغییرات pH و کاهش پسماند غذایی، کاهش یا متوقف شود (Chuang et al. 2011). راه حل این مشکل، استفاده از ترکیب تخمیر پسماندهای مختلف است. این امر می‌تواند بازدهی محیط را با کمبود مواد مغذی، تکمیل کرده و به تخمیر کامل منجر شود (Wang et al. 2011). پیشرفت‌هایی در روش‌های هضم مشترک برای تولید موثر هیدروژن زیستی حاصل شده است. به عنوان مثال: استفاده از کود گاو-پسماند شیر، فاضلاب

آشپزخانه، پسماند غذایی شهری، پسماند لجن گلیسیرول، فراورده‌های جانبی حاصل از تقطیر گیاه ریشه نشاسته ای، لجن فاضلاب مواد غذایی، لجن فشرده فاضلاب و لجن فاضلاب کاه برنج مورد استفاده قرار می‌گیرند. پسماند آب پنیرخام (پسماند مایع) از صنایع تولید پنیر تولید می‌شود؛ و غنی از پروتئین‌ها، لاکتوز و سایر مواد مغذی ضروری است. زباله‌های میوه و سبزیجات از بازارها و همچنین صنایع تولید می‌شوند، مواد مغذی ضروری هستند (Prazeres et al. 2012). پسماند آب پنیرخام و پسماند میوه و سبزیجات، به دلیل غنی بودن از ترکیبات آلی و قابل تجزیه‌پذیر، می‌توانند به عنوان منابعی از ماده غذایی برای ترکیب تخمیر جهت تولید هیدروژن زیستی مورد استفاده قرار گیرند. از آنجایی که هر دو این مواد به صورت عمده تولید می‌شوند؛ و به راحتی در دسترس هستند، آن‌ها به عنوان مواد اولیه ارزان قیمت محسوب می‌شوند؛ و استفاده از مواد اولیه بدون استریل منجر به ورود باکتری‌های مختلف و تنوع جمعیت آنها شود. مطالعات گزارش کرده اند که مخلوط کردن بخش کوچکی از مواد اولیه در طول هضم مشترک، جمعیت باکتری‌ها را تغییر می‌دهد. با این حال، مطالعات بیشتری برای توسعه این واقعیت مورد نیاز است (Wang et al. 2013a, b, c). گومز-رومرو و همکاران (2014) کارایی تولید هیدروژن زیستی آب پنیرخام و پسماند میوه و سبزیجات را با هضم مشترک با مطالعه تأثیرات توزیع میکروبی، نسبت‌های کربن به نیتروژن و ماده اولیه مشترک آزمایش کردند. آنها دریافتند که آب پنیرخام به عنوان یک پیش نیاز منحصر به فرد، بازده هیدروژن زیستی کمتری را نشان می‌دهد؛ و نسبت کربن به نیتروژن پایین موجب ظهور فاز تاخیری دوم می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل تغییر در شرایط رشد پس از فاز اولیه تولید هیدروژن زیستی باشد (Kim et al. 2009). افزایش اسیدیته محیط بر آنزیم‌های گلیکولیتیک میکروب‌ها نیز تأثیر می‌گذارد؛ و رشد میکروبی را مهار می‌کند؛ و در نتیجه بر عملکرد هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارد. آب پنیرخام دارای ظرفیت بافر^۱ کمتری است. این پنیر می‌تواند اسیدیته محیط را افزایش دهد؛ و در نتیجه فعالیت آنزیمی را مهار کند (Perna et al. 2012). همچنین گزارش شده است که استفاده از لجن به عنوان تنها ماده اولیه به دلیل ماهیت پروتئینی آن می‌تواند منجر به بازده هیدروژن زیستی کم شود (Zhu et al. 2008). افزودن آب پنیرخام با پسماند میوه و سبزیجات، تولید هیدروژن زیستی را نسبت به پسماند میوه و سبزیجات یا آب پنیرخام به تنهایی افزایش می‌دهد. این امر نشان می‌دهد عدم وجود پروتئین در پسماند میوه و سبزیجات یک عامل ضروری برای افزایش بازده هیدروژن زیستی است. نسبت کربن به نیتروژن بالا می‌تواند ناشی از افزایش اسیدیته محیط باشد. اسیدیته محیط می‌تواند تولید

۱. مقاومت در برابر تغییر PH

هیدروژن زیستی را تغییر دهد (Mohanakrishna et al. 2010). افزایش غلظت پسماند میوه و سبزیجات در حین مخلوط شدن با آب پنیر خام، فاز تاخیری تولید هیدروژن زیستی را افزایش می‌دهد؛ زیرا مواد سلولزی بیشتری برای هیدرولیز در اختیار میکروب‌ها قرار می‌گیرد. هیدرولیز سلولز می‌تواند به یک عامل محدود کننده در برخی از روش‌های هضم بی‌هوازی تبدیل شود. زو و همکاران (2008) در گزارش خود اعلام کردند که ترکیب پسماند مواد غذایی شهری با لجن فاضلاب، منجر به افزایش تولید بیشتر هیدروژن زیستی می‌شود. تنکا و همکاران (2011) زمانی که پسماند میوه و سبزیجات با کود حیوانی ترکیب می‌شوند، میزان تولید هیدروژن بیشتری از نظر حجمی را به دست آوردند. این امر نشان می‌دهد که قلیائیت محیط و نسبت کل اسیدهای چرب فرار و قلیائیت با غلظت سوپسترا و بازده هیدروژن زیستی ارتباط دارند. نسبت کربن به نیتروژن پایین نیز بر عملکرد هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارد؛ زیرا مقادیر پروتئین بالاتر در محیط، بازده تولید را مهار می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد نیاز به استفاده از مواد سلولزی وجود دارد. رادجرام و سراوان (2011) با هضم مشترک فاضلاب و گل فشرده در یک راکتور لجن بی‌هوازی با جریان روبه بالا، بازده بالاتری از هیدروژن زیستی به دست آوردند. تفاوت‌ها در بازده هیدروژن زیستی ممکن است به دلیل ویژگی‌های پیش نیاز، جمعیت میکروبی، شرایط pH، آماده سازی و شرایط هضم مشترک بی‌هوازی باشد (Gomez-Romero et al. 2014). مطالعات نشان می‌دهند که استفاده اولیه از مواد غذایی قابل تجزیه آسان، فعالیت متابولیک سریع‌تری در میکروب‌ها نسبت به مواد پیچیده دارد. این امر می‌تواند بهره‌ی هیدروژن زیستی را مهار کند. آنزیم‌های هیدرولیتیک (سلولازها، آمیلازها، لیپازها و پروتئازها) تولید شده توسط میکروب‌ها، درشت مولکول‌های پیچیده را به قند، گلیسرول، اسیدهای چرب با زنجیره بلند و اسیدهای آمینه تجزیه و حل می‌کنند. این فرآیند، انتقال مواد و مولکول‌ها به داخل و خارج سلول را افزایش می‌دهند (Parawira et al. 2005). معمولاً در مراحل اولیه تخمیر، افزایش اسیدهای لاکتیک و استیک مشاهده شده است؛ اما با افزایش غلظت اسید بوتیریک، غلظت آنها کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که در ساعات اولیه تخمیر آب پنیر خام، اسید لاکتیک به عنوان محصول نهایی لاکتوز تولید می‌شود. به طور مشابه، برای پسماند میوه و سبزیجات، استات محصول نهایی تخمیر است. باکتری کلوستریدیوم از مولکول‌های اسید لاکتیک و استات به عنوان منبع غذایی استفاده می‌کند؛ و با تجزیه آنها، فعالیت متابولیک خود را آغاز می‌کند؛ تا هیدروژن زیستی و بوتیرات تولید کنند. با جذب این کربوهیدرات‌های قابل هضم آسان، سلول‌ها لاکتات و استات را تولید می‌کنند. لاکتات و استات برای تولید ATP و تعادل واکنش اکسایش و کاهش در سلول مورد نیاز هستند. این فرآیند به شروع رشد سلولی کمک می‌کند. استات و لاکتات همراه با استفاده از

مواد پیچیده موجود در آب پنیرخام و پسماند میوه و سبزیجات تولید هیدروژن زیستی را افزایش می‌دهند. هنگامی که غلظت بوتیرات و استات به حداکثر می‌رسد، بازده هیدروژن زیستی بالا به دست می‌آید. بازده هیدروژن زیستی بالا نشان دهنده رقابت پیش نیاز بین گونه‌های باکتریایی تولید کننده هیدروژن و اسید لاکتیک است (Bando et al. 2013). وقتی آب پنیرخام توسط مخمرهای مختلف به اسید لاکتیک تبدیل می‌شود؛ و همچنین وقتی پسماندهای مربوط به میوه‌ها در آشپزخانه به لاکتات تبدیل می‌شود؛ سپس توسط کلوستریدیوم ترمولاکتیکوم تجزیه می‌شوند، باعث افزایش بهره‌وری در تولید بیشتر هیدروژن زیستی می‌شود (Azbar et al. 2009). لکتوباسیلوس بیفرمنتانس^۱ و کلوستریدیوم تیروبوتیریوم^۲ می‌توانند از استات و لاکتات استفاده کنند. این امر نشان می‌دهد افزایش تولید هیدروژن زیستی و سطوح بوتیرات به مصرف استات و لاکتات مرتبط است. تولید هیدروژن زیستی از لاکتات نیاز به استات دارد، زیرا در صورت عدم وجود استات، سلول‌های میکروبی باید ابتدا استات را توسط واکنش‌های متابولیک خود تولید کنند (Grause et al. 2012).

چندین پیش نیاز آلی، به‌عنوان مثال: نشاسته، کربوهیدرات، فاضلاب فرآوری سیب‌زمینی، چغندر قند، و پسماندهای تولیدی در صنایع آبجو و آب پنیر، برای تولید هیدروژن زیستی از طریق تخمیر اسیدی تحت شرایط مختلف (گرم، گرمای بسیار زیاد و دمای متوسط) آزمایش شده‌اند؛ و تغییرات در بازده‌ها مشاهده شده است (Venetsaneas et al. 2009). تعادل تخمیر را می‌توان با انواع پارامترهای عملیاتی و بیوشیمیایی مختل کرد. هنگامی که از مواد اولیه زیست تخریب پذیر استفاده می‌شود، تولید اسیدهای چرب فرار توسط باکتری‌های اسیدساز می‌تواند تولید هیدروژن زیستی را با تغییر ظرفیت بافر و pH تغییر دهد. این امر نقش مهمی در مسیرهای متابولیکی میکروب‌ها دارند. pH بهینه برای تخمیر در بازه‌ی ۵ تا ۶ قرار دارد؛ زیرا در این بازه، از تشکیل حلال و تولید متان جلوگیری می‌شود؛ و در نتیجه تولید هیدروژن زیستی را افزایش می‌دهد. مقادیر pH کمتر از ۴/۵ به شدت بر فعالیت آنزیم هیدروژناز تأثیر می‌گذارد؛ و مسیرهای متابولیکی میکروب‌ها را به سمت مسیرهای دیگر هدایت می‌کند. به طور مشابه، pH ضعیف یا خنثی نیز مسیر میکروبی را به سمت تولید اسید استیک^۳ و تولید متان هدایت می‌کند (Wu et al. 2010). بنابراین با اضافه کردن اسید، بازه‌های pH بهینه حفظ می‌شوند. کود دام، که شامل مواد مغذی و منابع قلبایی مورد نیاز برای رشد سلولی است،

1. *Lactobacillus bifementans*

2. *Clostridium tyrobutyricum*

۳. هوموآستیتوژن یکی از ویژگی‌های باکتری است که به معنای توانایی تولید استیک اسید توسط باکتری‌ها است.

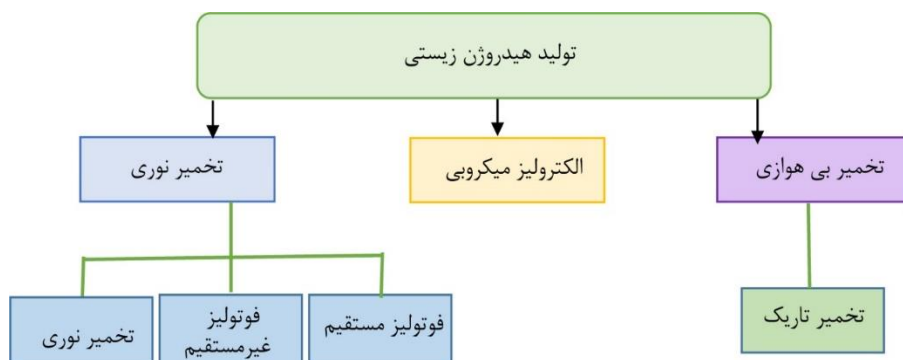
به عنوان یک ماده اولیه ایده آل در فرآیند تخمیر محسوب می شود؛ زیرا زمانی که با کربوهیدرات های قابل تجزیه آسان ترکیب می شود، فرآیند تخمیر را فعال می کند. پسماند دامی می تواند به عنوان یک منبع قابل تجدید برای تولید هیدروژن زیستی در مناطق صنعت دام مورد استفاده قرار گیرد. پسماندهای مایع خوک نیز می توانند به عنوان منبع تجدیدپذیر مناسب برای تولید هیدروژن زیستی عمل کنند؛ زیرا در مزارع خوک به صورت فراوان در دسترس هستند؛ اما تحقیقات کمی با استفاده از این منبع صورت گرفته است. استفاده از پسماندهای مایع خوک به عنوان تنها پیش نیاز، منجر به بازده هیدروژن زیستی کمتری در شرایط دمایی متوسط و دمایی بالا می شود (Wagner et al. 2009). هنگامی که کود خوک با گلوکز (ماده ای که به راحتی قابل هیدرولیز است) مخلوط شد، بازده هیدروژن زیستی بالا به دست آمد. مدیریت پسماندهای میوه و سبزیجات می تواند تولید بیشتری از هیدروژن زیستی را افزایش دهد؛ زیرا این پسماندها ارزان، در دسترس و دارای مقادیر قندی غنی هستند. آزمایشات گروهی انجام شده در دماهای متوسط با انواع مختلفی از پسماندهای میوه و سبزیجات، به عنوان مثال: مخلوط ترکیبی از سبزیجات، تفاله کلم-هویج، باقیمانده های کاهو، پوست سیب زمینی، پوست میوه ای از تیره انجیرها و پوست لیمو شیرین، منجر به بازده بیشتری از هیدروژن زیستی شد (Zhu et al. 2009a, b). تنکا و همکارانش (2011) بررسی کردند که افزودن کود خوک (به عنوان کوآنزیم) به پسماندهای میوه و سبزیجات در شرایط دمایی بالا چگونه بر عملکرد هیدروژن زیستی تأثیر می گذارد. آنها سعی کردند با تثبیت ظرفیت بافر کود بدون اضافه کردن ماده قلیایی، عملکرد هیدروژن زیستی را به حداکثر برسانند؛ اما بازده بسیار کم یا هیچ بازده ای از هیدروژن زیستی دریافت نکردند. آنها مشاهده کردند که هنگامی که کودخوک با یک ماده کربوهیدراتی با کیفیت کم ترکیب شود، به جای هیدروژن زیستی، بازده بیشتری از متان تولید می شود؛ زیرا رشد باکتری های تولیدکننده متان افزایش می یابد. نسبت بالای پسماند میوه و سبزیجات نسبت به کود خوک نیز منجر به کاهش عملکرد هیدروژن زیستی شد؛ زیرا pH محیط به شدت کاهش یافت. ترکیب پسماندهای میوه و سبزیجات (۴۰ درصد) با کود خوک (۶۰ درصد) منجر به تولید هیدروژن زیستی بیشتر شد. این امر نشان می دهد که تعادل بهینه ای بین بخش کربوهیدراتی پسماندهای میوه و سبزیجات و نسبت قلیایی کود خوک وجود دارد. اکثر مطالعات انجام شده در مورد تولید هیدروژن زیستی توسط تخمیر تاریک بر تأثیر نوع پیش نیاز و غلظت یا دما متمرکز شده است (Khan et al. 2018). در چند سال اخیر، تأثیر عناصر کم یاب در تولید هیدروژن زیستی مورد بررسی قرار گرفته است؛ و گزارش شده است که این عناصر می توانند بر بازده هیدروژن زیستی تأثیر بگذارند (Yang and Shen 2006). هر عنصر کم یاب نقش مهمی در فعالیت متابولیکی میکروبها ایفا

می‌کند؛ و در نتیجه بر تولید هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارد. برای مثال، یون آهن دو ظرفیتی و یون نیکل دو ظرفیتی بخش‌های ضروری آنزیم هیدروژناز^۱ (محل فعال) هستند. آنزیم هیدروژناز را می‌توان به [Ni-Fe]، [Ni-Fe-Se] یا [Fe] طبقه بندی کرد. به طور مشابه، Mg^{+2} به عنوان انتقال دهنده ATP مشارکت می‌کند؛ و همچنین جزء کلیدی آنزیم‌های مختلف است. علاوه بر این، (Zn^{+2}) و (Mn^{+2}) نیز اهمیت دارند؛ زیرا بر بقای سلول‌ها و رشد آن‌ها تأثیر می‌گذارند؛ و در نتیجه تولید هیدروژن زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Mohan and Srikanth 2012). مطالعات بهینه سازی با روش‌های آماری، سنتی و ریاضی می‌تواند نیاز عناصر کمیاب مورد نیاز در طول تخمیر را تعیین کند. هر روش دارای مزایا و معایب است که در آن روش‌های سنتی گران هستند؛ و زمان زیادی را نیاز دارد؛ اما روش‌های آماری کارآمد، موثر و اقتصادی هستند. انجام روش‌های تجزیه و تحلیل واریانس می‌تواند تخمیر هیدروژن زیستی را بهینه کند (Singh et al. 2017). کسکین و همکاران (2018) برای اولین بار اثر ۱۱ عنصر کمیاب (Ni، Zn، Fe، B، Mn، Mo، Cu، Se، W، Al و Co) بر عملکرد هیدروژن زیستی پسماند میوه و سبزیجات را بررسی کردند. پسماندهای میوه و سبزیجات شامل جعفری، خیار، کاهو، کدو سبز، لیمو، گیاه خرفه، شاهی، شوید، فلفل سبز، سیب‌زمینی، کلم، لوبیا سبز، گوجه‌فرنگی، گل کلم، بادمجان و فلفل قرمز بودند. آن‌ها مقادیر ماده آلی و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی این پسماندهای میوه و سبزیجات را تعیین کردند؛ و متوجه شدند که همه آن‌ها قابل تجزیه‌پذیر هستند؛ و سطح آلومینیوم و سدیم آن‌ها نیز کمتر است. آن‌ها عملکرد هیدروژن زیستی را به عنوان قابلیت هیدروژن بیوشیمیایی^۲ تعیین کردند؛ و گزارش دادند که پسماند میوه و سبزیجات می‌توانند به عنوان پیش نیاز مناسب برای تولید انرژی استفاده شوند؛ زیرا عملکرد هیدروژن زیستی بالاتر به دست آمده است. لین و چنگ (2006) وقتی که زایلوز به عنوان یک پیش نیاز در راکتورهای متوالی استفاده شد، بازده بالایی از هیدروژن زیستی به دست آوردند. اوکاموتو و همکاران (2000) نیز نتایج مشابهی را هنگام استفاده از پسماندهای کلم و هویج در مطالعات تخمیر راکتور متوالی به دست آوردند. موهان و همکاران (2009) در آزمایش خود با مخلوط پسماندهای سبزیجات، بازده بیشتری در تولید هیدروژن زیستی به دست آوردند. نتایج مشابهی توسط دانگ و همکاران (2011) برای پسماند سیب زمینی، کاهو و نشاسته به دست آمد. سطح هیدروژن زیستی به طور مستقیم بر تنوع میکروبی در محیط کشت تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، در شرایط گرمایی، بهره‌ی هیدروژن

۱. هیدروژنازها، آنزیم‌هایی هستند که در فرآیند تخمیر هیدروژن، تجزیه و تولید هیدروژن شرکت دارند.

زیستی و همچنین تنوع میکروبی بیشتر است. غلظت اسیدهای چرب فرار (اسید بوتیریک) نیز بر عملکرد هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، افزایش غلظت اسید بوتیریک عملکرد هیدروژن زیستی را کاهش می‌دهد. افزودن عناصر کم‌یاب تغییر قابل توجهی در تولید هیدروژن زیستی ایجاد می‌کند و باعث افزایش دو تا سه برابری آن می‌شود.

علاوه بر غلظت عناصر کم‌یاب، نوع این عناصر نیز بر تولید بیشتر هیدروژن زیستی تأثیر دارد. برای بهینه‌سازی فرآیند، بیشتر مطالعات مرتبط با استفاده از پیش نیازها و اعمال عناصر کم‌یاب مانند روی، مس، آهن و نیکل انجام شده است. الشیاب و همکارانش (2008) تأثیر عناصر کمیاب، یعنی مس، آهن و منیزیم را به طور مستقل بر تولید هیدروژن زیستی توسط کلسترییدیوم در یک راکتور مدار بسته بررسی کرد؛ و بازده قابل توجهی به دست آورد؛ اما زمانی که عناصر روی و مس به عنوان عناصر کمیاب با گلوکز به عنوان یک پیش نیاز استفاده می‌شدند، بازده بالاتر بود. یانگ و شن (2006) پیشنهاد کردند که وقتی نشاسته با عنصر آهن مخلوط شد، بازده قابل توجهی به دست آمد. هنگامی که پسماندهای میوه و سبزیجات به عنوان پیش نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرند، عناصر کمیاب مانند روی، کبالت، نیکل و آهن تأثیر قابل توجهی بر بازده هیدروژن زیستی دارند. روش‌های تخمیر نوری، تجزیه بیولوژیکی با نور و تخمیر تاریک روش‌هایی هستند که از لحاظ هزینه‌ای مقرون به صرفه بوده؛ و همچنین سازگار با محیط زیست هستند. تخمیر بی‌هوازی یا تخمیر تاریک به عنوان یک روش امیدوارکننده برای تولید هیدروژن زیستی به نظر می‌رسد؛ زیرا منجر به بازده بالا، نیاز کمتر به انرژی، قابلیت بالا و قابلیت استفاده از منابع اولیه تجدیدپذیر (آب و فاضلاب) را دارند (Argun et al. 2017) (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴. فرآیندهای بیولوژیکی مرتبط با تولید هیدروژن زیستی (برگرفته از Saratale et al. 2019)

گلوکز با تخمیر تاریک، هیدروژن را از طریق مسیرهای بوتیرات یا استات تولید می‌کند. عوامل متعددی به عنوان مثال: آماده سازی سلول‌های میکروبی برای افزودن به محیط، دما، تنظیمات راکتور و pH بر تولید هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارند (Kanchanasutaa et al. 2016). آرکی‌ها و سایر دسته بندی‌های دیگر باکتریایی به دلیل طبیعت گرمادوستی خود عملکرد برتری در تولید هیدروژن دارند. این عملکرد مزایایی مانند نرخ بالا تولید هیدروژن زیستی، چسبندگی کمتر محیط، تقویت هیدرولیز ماده مغذی و سطح کمتر آلودگی را به همراه دارد (Pradhan et al. 2015). باکتری‌های متعلق به راسته ترموتوگال‌ها برای تبدیل زیستی صنعتی مواد زائد ایده‌آل هستند؛ زیرا بازده هیدروژن زیستی بالاتری دارند؛ و می‌توانند به طور موثر پیش نیازهای حاوی کربوهیدرات را تخمیر کنند (Cappelletti et al. 2012). استفاده از مواد اولیه، چگالی زیست توده و عملکرد هیدروژن زیستی در باکتری ترموتوگا *ناپولیتانا*^۱ در محلول‌های کربوهیدرات خالص، بهبود قابل توجهی نسبت به هیدرولیز گیاه علف تفره‌ای دارد. این ممکن است به این دلیل باشد که اضافه کردن مواد مغذی به محیط، تخمیر کارآمدتری را به وجود می‌آورد. عملکردهای هیدروژن زیستی باکتری ترموتوگا *ناپولیتانا* از هیدرولیز تفاله هویج نیز بسیار بالا بود (de Vrije et al. 2010). در چند سال اخیر، گزارش شده است که باکتری ترموتوگا *ماریتیم* نیز قابلیت تولید هیدروژن زیستی از انواع مختلفی از محلول کربوهیدرات را دارد؛ زیرا باکتری ترموتوگا *ماریتیم* آنزیم‌های هیدرولیتیکی از جمله اینورتاز، زیلاناز و سلولاز را ترشح می‌کند. این آنزیم‌ها علاوه بر مقاومت حرارتی، زنجیره پلیمری کربوهیدرات را به تک‌مونومرهای ساده هیدرولیز می‌کنند (Boileau et al. 2016). سعیدی و همکاران (2018) تأثیر کشت باکتری ترموتوگا *ماریتیم* بر تولید هیدروژن زیستی از پسماند میوه و سبزیجات را با افزودن آب دریا به عنوان منبع عناصر معدنی بررسی کردند؛ و عملکرد به طور قابل توجهی بالاتری به دست آوردند. مطالعات نشان داده‌اند که رشد باکتری ترموتوگا *ماریتیم* به خمیر مخمر، گلوکز، غلظت هیدروژن محلول، و تیوسولفات وابسته است؛ و می‌تواند از هردو کربوهیدرات ساده و پلی‌ساکاریدهای پیچیده استفاده کند (Boileau et al. 2016). محصولات نهایی تخمیر باکتری ترموتوگا *ماریتیم* شامل هیدروژن، استات، دی‌اکسید کربن و مقدار کمی اسید لاکتیک است. باکتری ترموتوگا *ماریتیم* در مقایسه با باکتری ترموتوگا *ناپولیتانا*، وقتی روی تفاله هویج در بیوراکتور رشد می‌کند، عملکرد بالاتری در تولید هیدروژن زیستی دارد؛ زیرا باکتری ترموتوگا *ناپولیتانا* قادر به رشد نمی‌باشد. باکتری ترموتوگا *ماریتیم* می‌تواند قابلیت اکسیداسیون-احیا محیط رشد را در صورت وجود منبع گلوکز کاهش دهد (Lakhal et al. 2011). تخمیرنوری توسط جانداران فتوسنتزی انجام می‌شود. این جانداران

1. *Thermotoga neapolitana*

فتوستنتزی نور را به عنوان منبع انرژی برای تجزیه مواد آلی ساده (مونوساکاریدها یا اسیدهای چرب قابل تبخیر) به هیدروژن زیستی استفاده می‌کنند (Escamilla-Alvarado et al. 2012). با این حال، تخمیر تاریک باعث تولید هیدروژن زیستی می‌شود؛ به این صورت که مولکول‌های آلی پیچیده به هیدروژن، اسیدهای آلی فرار، قندهای ساده و الکل‌ها تجزیه می‌شوند. در نتیجه تخمیر تاریک نسبت به تخمین‌نوری ترجیح داده می‌شود؛ زیرا نیازی به نور ندارد. در فرآیند تولید اسید و تولید استات توسط باکتری‌های بی‌هوازی مانند (گونه‌های *کلوستریدیوم*، گونه‌های *رومینوکوکوس*، گونه‌های *ترموناوروباکتریوم*، گونه‌های *انتروباکتر* یا گونه‌های *باسیلوس*) هیدروژن به عنوان محصول نهایی تولید می‌شود (Zagrodnik and Laniecki 2015). در تخمیر تاریک، پیش نیاز هایی که از گیاهان به دست می‌آیند (مانند پسماند میوه و سبزیجات یا پسماند کشاورزی) ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا اجزای اصلی آنها لیگنوسلولز می‌باشند؛ و مرحله آماده‌سازی تجزیه آنها را آسان تر می‌کند (Sindhu et al. 2016). یک پیش نیاز مناسب باید دارای مقادیر کربوهیدرات غنی، تجدیدپذیر، به راحتی در دسترس و ارزان باشد؛ و نیاز به پیش‌آماده‌سازی کم داشته باشد. پیش نیازهای ایده‌آل در این راستا شامل پسماند میوه و سبزیجات، تفاله چغندر قند و سیلاژ ذرت^۱ هستند. سیلاژ ذرت، سازگاری مناسبی برای تولید هیدروژن زیستی دارند؛ اما در تماس با هوا در معرض کپک‌هایی مانند *آسپرژیلوس*، *پنی‌سیلیوم*، *گیبیرلا*^۲ و *فیوزاریوم*^۳ قرار می‌گیرند. سیلاژ ذرت آسیب پذیر هستند (Lukajtis et al. 2018). در مطالعه انجام شده توسط سیسیورا - وووخ و همکارانش در سال (2020)، تخمیر تاریک پسماند میوه و سبزیجات، سیلاژ ذرت و تفاله چغندر قند تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت؛ و باعث تولید هیدروژن زیستی شد. در طول تخمیر، افزایشی در جمعیت باکتری‌های تولیدکننده متان نیز مشاهده شد. در مطالعه وانگ و همکارانش (2011) گزارش شده است که نرخ بارگذاری آلی پایین، حتی در صورتی که pH پایین باشد، به تولید هیدروژن زیستی و متان در فرایند تخمیر تاریک کمک می‌کند. باکتری‌های تولیدکننده متان برای تولید متان از هیدروژن استفاده می‌کنند؛ اما باکتری‌های اسید استیک بدون تولید هیدروژن، اسید استیک را از شکرها تولید می‌کنند. هنگامی که آزمایش متوالی با غلظت بالاتری از ماده آغازگر (محیط کشت مغذی) همراه با پسماند میوه و سبزیجات، پسماند آشپزخانه و چربی‌های گیاهی و حیوانی انجام می‌شود، باعث افزایش بازده هیدروژن زیستی می‌شود؛ زیرا مجموعه‌ای از پیش نیازها برای میکروب‌ها در

۱. سیلاژ ذرت، یکی از باکیفیت‌ترین منابع تأمین غذای دام است که باعث افزایش شیردهی دام و پرواری آن می‌شود.

2. *Gibberella*

3. *Fusarium*

دسترس قرار می‌گیرد. پسماند آشپزخانه نیز به عنوان یک پیش نیاز مناسب عمل می‌کند؛ زیرا از میوه‌ها، سبزیجات، چربی‌های گیاهی و حیوانی، ماهی و ... تشکیل شده است. با این حال، بازده هیدروژن زیستی از سیلاژ ذرت نسبت به پسماند میوه و سبزیجات و تفاله چغندر قند کمتر است (Cieciora-Włoch and Borowski 2019). ویجایاراغوان و دسا (2006) کارایی تولید هیدروژن زیستی فاضلاب‌های حاوی پساب کارمنزلی روغن نخل و همچنین فاضلاب کارمنزلی آبجوسازی را آزمایش کردند؛ و بازده بالاتری از این پساب به دست آوردند. پساب کارخانه‌های آرد برنج نیز به دلیل مقادیر بالای نشاسته، بازده بیشتری از هیدروژن زیستی دارد. تولید هیدروژن زیستی توسط باکتری کلسترییدیوم ترمولاکتیکوم از پسماند لبنی (Collet et al. 2004) و هضم مشترک پسماند غذایی با فاضلاب (Kim et al. 2004) به طرز قابل توجهی بیشتر بود. زمان ماند هیدرولیک بالا و افزودن مواد مغذی به محیط به تولید هیدروژن زیستی بالا کمک می‌کند (Van-Ginkel et al. 2005). بازده هیدروژن زیستی به دست آمده با گلوکز نسبت به ساکارز و زایلوز بیشترین مقدار است (Lin and Cheng 2006). پسماند پوست میوه ای از تیره انجیرها (Vijayaraghavan et al. 2006) و پساب آرد روغن خرما فرآوری شده توسط تخمیر بیهوازی (Vijayaraghavan and Desa 2006) فرآوری شده توسط تخمیر بی هوازی منجر به بازده هیدروژن زیستی به میزان قابل توجهی می‌شود.

در حال حاضر، هیدروژن عمدتاً از سوخت‌های فسیلی با استفاده از روش‌های شیمیایی، گازسازی و تخمیر نوری/تاریک تولید می‌شود (Trane et al. 2012). تولید هیدروژن از طریق پردازش ترموشیمیایی پسماند می‌تواند به عنوان یک جایگزین برای سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرد؛ اما برخی محدودیت‌ها وجود دارد (Balat 2010). پیرولیز باعث تجزیه زیست توده جامد در دماهای بسیار بالا می‌شود. تنوع بسیار زیادی از پسماند، مانند: پوست زیتون، پسماند مزرعه گیاه ریشه نشاسته ای، پوست برنج، زیست توده جنگلی و پسماند کشاورزی، توسط روش پیرولیز با استفاده از کاتالیزورهای مختلف (ZSM-5 , K_2CO_3)، دولومیت و کاتالیزور تجاری ($\text{NiMo/Al}_2\text{O}_3$) تجزیه می‌شوند (Bakar and Titiloye 2013). وقتی پسماند سبزیجات آشپزخانه به همراه ژل سیلیکا و شن سیلیس به عنوان کاتالیزور استفاده شدند، در حین تجزیه حرارتی برای تحلیل دما، نشان داد که بازده هیدروژن زیستی به طور مستقیم با زمان پیرولیز مرتبط است. این امر نشان می‌دهد که با افزایش زمان پیرولیز، بازده بیشتری حاصل می‌شود (Agarwal et al. 2013). در تحقیقی که توسط چینگلان و همکاران (2010) انجام شد، گزارش شده است که بازده هیدروژن نیز با دمای پیرولیز مرتبط است. این یعنی با افزایش دما، بازده بیشتری حاصل می‌شود. پیرولیز پسماند سبزیجات

آشپزخانه با استفاده از ژل سیلیکا منجر به تولید قابل توجهی از هیدروژن زیستی شد؛ زیرا بازده مستقیماً با دمای پیرولیز مرتبط بود. چن و همکاران (2003) همچنین نتایج مشابهی را مشاهده کردند که تجزیه در اثر حرارت خاک اره و کاه برنج با Cr_2O_3 به عنوان کاتالیزور انجام شد. این امر نشان می‌دهد کاتالیزور می‌تواند بر عملکرد تأثیر بگذارد. پژوهشگران پیشنهاد داده‌اند که هضم مشترک پسماند آلی استریل شده با محیط کشت، باعث افزایش بازده می‌شود. این امر به دلیل تولید نسبت متعادل کربن به نیتروژن و برقراری ارتباط همزیستی موثر بین میکروب‌ها است. هضم مشترک مقدار اسیدهای آلی فرار را در محیط تنظیم نموده و تولید گاز را در طول تولید هیدروژن زیستی نیز محدود می‌کند. غلظت اسید بوتیریک بالا، رشد بسیاری از سویه‌های باکتریایی تولیدکننده هیدروژن را محدود می‌کند (Angeriz-Campoy et al. 2015). باکتری‌های بی‌هوازی اختیاری و اجباری که از پسماندهای آلی به عنوان مواد مغذی استفاده می‌کنند، می‌توانند بازده هیدروژن زیستی را بهبود بخشند؛ زیرا این باکتری‌ها می‌توانند قندهای پیچیده را به مونومرهای هیدرولیز کنند. باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن می‌توانند به راحتی روی این مونومرها عمل کنند (Mthethwa et al. 2019). با این حال، پیش پردازش اسیدی می‌تواند باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن را از بین ببرد؛ بنابراین می‌تواند بر عملکرد کل تأثیر بگذارد (Prabakar et al. 2019). هرناندز و همکاران (2014) مخلوط لایه ژله ای قهوه با کود خوک را برای تولید هیدروژن زیستی آزمایش کرد و بازده بالاتری را همراه با سایر محصولات مانند اسیدهای استیک و بوتیریک به دست آورد. کانو (2015) تولید هیدروژن زیستی از پسماندهای آلی شهری را بررسی کرد؛ و بازده بسیار بالاتری را به دست آورد. کاردناس و همکاران (2019) پسماند میوه و سبزیجات را خرد کردند؛ و با لایه ژله ای قهوه تازه مخلوط کردند؛ و همراه با مقداری آهک کشاورزی به یک بیوراکتور منتقل کردند؛ و بازده بسیار بالاتری به دست آوردند. زمانی که پسماند مواد غذایی با زباله‌های آلی جامد شهری مخلوط می‌شوند، تولید هیدروژن زیستی بهبود می‌یابد (Angeriz-Campoy et al. 2015). توفیق و القلیش (2014) گزارش دادند که بازده هیدروژن زیستی با فرآیند هضم مشترک دو برابر می‌شود. بازده هیدروژن از پسماندهای جامد آلی شهری می‌تواند به دلیل افزایش غلظت آمونیوم کاهش یابد. pH یک فاکتور مهم در تولید هیدروژن زیستی توسط فرآیند تخمیر است؛ زیرا pH پایین تر می‌تواند به غشای پلاسمایی میکروبی آسیب برساند؛ و می‌تواند فعالیت آنزیم هیدروژناز را مهار کند.

۴-۲-۱ عوامل موثر بر تولید هیدروژن زیستی

تولید موفقیت‌آمیز هیدروژن زیستی به شرایط محیطی بستگی دارد. زمانی که شرایط بهینه در دسترس باشد، باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن به حداکثر رشد می‌رسند. این به نوبه خود باعث افزایش بازده هیدروژن زیستی می‌شود (Kim et al. 2008). تعدادی از عوامل فیزیکوشیمیایی بر عملکرد هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارد.

الف) آماده سازی:

باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن فقط زمانی می‌توانند به رشد حداکثر خود برسند که جمعیت باکتری‌های مصرف کننده هیدروژن کاهش یابد؛ زیرا این امر منجر به بازده بیشتر هیدروژن زیستی می‌شود. این باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن قادرند در شرایط از حرارت زیاد یا pH بالا، به خوبی رشد کنند (Valdez-Vazquez and Poggi-Varaldo 2009). محیط کشت مخلوط نه تنها حاوی باکتری‌های تولید کننده هیدروژن، بلکه سویه‌های باکتریایی تولید کننده متان و اسید است. بنابراین آماده سازی برای از بین بردن سویه‌های باکتریایی مصرف کننده هیدروژن ضروری است (Kim et al. 2009). یاسین و همکاران (2011) گزارش دادند که پس از اعمال حرارت بر روی پسماند غذایی، جمعیت‌های بالایی از باکتری‌های گونه کلستریوم و گونه کالوراماتور استرالیکوس^۱ مشاهده شد. بدون آماده سازی، جمعیت متان و باکتری‌های تولید کننده اسید افزایش یافته است. آماده سازی حرارتی به روش اتوکلاو یا جوشاندن روشی ارزان و ساده در مقایسه با تصفیه شیمیایی است (Danko et al. 2008). آرگون و کرجی (2009) در گزارش خود اعلام کردند که افزایش مدت زمان تصفیه حرارتی به طور موثر باعث حذف سویه‌های باکتریایی تولیدکننده متان و اسید می‌شود.

ب) pH:

pH همچنین با تأثیر بر مسیرهای متابولیک، فعالیت آنزیمی و تولید هیدروژن زیستی بر تولید هیدروژن زیستی از پسماند مواد غذایی تأثیر می‌گذارد (Zhu et al. 2009a, b). pH بسیار مهم است؛ زیرا می‌تواند رشد باکتری‌های تولید کننده متان را محدود کند (Pan et al. 2019). باکتری‌های تولید کننده متان و استات^۲ در بازه pH ۶/۳ تا ۷/۸ فعال هستند. این بازه pH برای باکتری‌های تولید کننده هیدروژن مناسب نیست. این باکتری‌های تولید کننده هیدروژن

1. Caloramator australicus

۲. استوژن میکروارگانیزی است که استات را به عنوان محصول نهایی تنفس بی هوازی یا تخمیر تولید می‌کند.

برای رشد به محدوده PH ۵ تا ۶ نیاز دارند؛ و اگر PH بالاتر از این محدوده باشد، رشد آنها متوقف می‌شود؛ و در نتیجه تولید هیدروژن زیستی کمتر می‌شود (Kim et al. 2011d). یاسین و همکاران (2011) بازده هیدروژن زیستی بالاتری را در PH ۷ به دست آوردند. محدوده pH پایین نه تنها رشد باکتری‌های تولید کننده هیدروژن را متوقف می‌کند، بلکه بر تخریب پیش نیازها نیز تأثیر می‌گذارد. بسیاری از مطالعات کنترل pH اولیه در ۵-۶ در صورت انجام آماده سازی شیمیایی پیشنهاد کرده اند؛ اما ثابت شده است که pH خنثی برای بازده هیدروژن زیستی بهترین است.

کیم و همکاران (2011c, e) گزارش داد که تولید هیدروژن زیستی در pH کمتر از ۴ و بالاتر از ۸ وجود ندارد. PH بسیار پایین (اسیدی) می‌تواند تعادل سلولی را مختل کند؛ و بیشتر انرژی تولید شده توسط سویه‌های باکتریایی به جای تولید هیدروژن زیستی صرف خنثی کردن PH می‌شود (Zong et al. 2009). عدم وجود ATP فعال می‌تواند بر آنزیم هیدروژناز و همچنین آنزیم‌های حاوی آهن در باکتری‌های تولید کننده هیدروژن تأثیر بگذارد. pH بالاتر از ۸/۵ همچنین بر عملکرد و تولید هیدروژن زیستی تأثیر می‌گذارد؛ زیرا مرحله تأخیری بیشتر از حالت نرمال طول می‌کشد. گزارش شده است که بازده هیدروژن زیستی در سیستم‌های تخمیر متوالی نسبت به سیستم‌های پیوسته بالاتر است؛ زیرا سیستم متوالی نیاز به فاصله‌های زمانی کوتاه برای تکمیل فرآیند تخمیر دارد. بازده هیدروژن زیستی را نیز می‌توان با مخلوط کردن محیط کشت با بافرها و قلیاها (هیدروکسید پتاسیم، کربنات کلسیم و هیدروکسید سدیم) افزایش داد (Maranon et al. 2012).

ج) دما:

بازده هیدروژن زیستی حاصل از پسماند غذا و سبزیجات و پسماند فرآورده‌های صنعتی بسیار تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد. حفظ شرایط دمای متوسط در سطح فرآورده‌های صنعتی به آسانی قابل کنترل است؛ زیرا در اکثر موارد، تولید هیدروژن زیستی در این شرایط اتفاق می‌افتد. دمای متوسط (۳۷-۳۰ درجه سانتیگراد) می‌تواند پسماند غذایی را مستقیماً به هیدروژن زیستی تبدیل کند. با این حال، شرایط دمای بالا نیز منجر به بازده هیدروژن زیستی بهتر می‌شود. به عنوان مثال، کرگی و همکاران (2012) مشاهده کردند که در دمای بالا، بازده هیدروژن زیستی حاصل از آب پنیر خام بیشتر از دمای متوسط است. این امر به دلیل تولید اسید لاکتیک است. اسید لاکتیک باعث کاهش جمعیت باکتری‌های تولیدکننده هیدروژن زیستی می‌شود.

چو و همکاران (2008) گزارش کردند که دماهای متوسط برای باکتری‌های تولید کننده متان

مناسب هستند. آماده سازی با گرما یا حفظ دمای بالا می تواند باکتری های تولید کننده اسید را کاهش دهد؛ و می تواند رشد باکتری های تولید کننده هیدروژن را افزایش دهد؛ و در نتیجه بازده هیدروژن زیستی را افزایش دهد.

د) اسیدهای چرب فرار:

تجزیه بی هوازی پسماند مواد غذایی باعث تولید محصولات نهایی مانند اسید بوتیریک، اسید استیک، اسید پروپیونیک و اسید لاکتیک می شود. به طور کلی، تولید هیدروژن زیستی با تولید اسید استیک و بوتیریک همراه است. اگر محصولات نهایی اسید پروپیونیک و اسید لاکتیک باشند، بازده هیدروژن زیستی مشاهده نمی شود (Kim et al. 2008). عدم موفقیت در تخمیر هیدروژن پسماند غذایی می تواند رشد باکتری های اسید لاکتیک را تقویت کند. حرارت، شوک pH یا پیش تصفیه های شیمیایی می توانند باکتری های اسید لاکتیک و همچنین باکتری های مصرف کننده هیدروژن را کاهش دهند (Kim et al. 2009). در شرایط محیطی بسیار سخت، باکتری های تولید کننده هیدروژن می توانند جوانه بزنند؛ و فعالیت خود را آغاز کنند؛ اما باکتری های مصرف کننده هیدروژن قادر به زنده ماندن و فعالیت بهینه نیستند. تخمیر پسماند مواد غذایی و فرآوری پسماند مواد غذایی تحت شرایط محیطی کنترل شده می تواند بوتیرات تولید کند؛ و از تولید اسیدهای لاکتیک و پروپیونیک جلوگیری می کند (Valdez-Vazquez et al. 2009).

۴-۳ بیودیزل

سوخت های زیستی سازگار با محیط زیست و تجدیدپذیر هستند. در دهه گذشته، این سوخت زیستی در دهه گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده اند؛ زیرا می توانند جایگزین سوخت های فسیلی شوند (Murugesan et al. 2009). گاهی اوقات از آنها به عنوان منابع انرژی سبز یاد می شود. انرژی سبز را می توان نوعی انرژی سازگار با زیست محیط و تجدیدپذیر تعریف کرد. می توان آن را برای فرآیندهای صنعتی و فرآیندهای غیر صنعتی استفاده کرد. انرژی سبز، منبعی امیدوارکننده هستند. انرژی سبز به حفظ محیط زیست و منابع طبیعی کمک می کند. صنعت حمل و نقل بزرگترین تولید کننده گازهای گلخانه ای است؛ و این امر می تواند با استفاده از بیودیزل به حداقل برسد. سوزاندن سوخت های فسیلی متداول، ذرات مضر را آزاد می کند. این ذرات برای جو و سلامت انسان خطرناک است. استفاده از بیودیزل به عنوان سوخت می تواند این خطر را به حداقل برساند (Panwar et al. 2011). بیودیزل از یک مونو آلکیل یا اتیل یا متیل استر اسیدهای چرب با زنجیره بلند تشکیل شده

است. این استرها از چربیهای پایدار (چربی‌های حیوانی یا روغن‌های گیاهی) به دست می‌آید. این سوخت می‌تواند به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های معمولی برای به حرکت درآوردن موتورهای دیزلی استفاده شود (Canakci 2007). روغن‌های گیاهی را می‌توان با روش‌های اختلاط، شکست حرارتی، میکروامولسیون و ترانس‌استریفیکاسیون به سوخت موتورهای احتراق تراکمی تبدیل کرد. در مقیاس تجاری، تولید بیودیزل با ترانس‌استریفیکاسیون روغن گیاهی با الکل صورت می‌گیرد. الکی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد، اتانول یا متانول است؛ زیرا می‌توانند به راحتی از زیست توده تولید شوند؛ و باعث فرسایش موتور نمی‌شوند (Choudhury and Bose 2008). مواد خام سازگار با محیط زیست برای تولید بیودیزل شامل روغن‌های گیاهی خالص (روغن‌هایی که به طور مستقیم از گیاه استخراج می‌شوند؛ و روغن‌هایی که از پسماند گیاهی استخراج می‌شوند)، روغن‌های پسماندی، چربی‌ها/روغن‌های حیوانی، روغن خوراکی و فرآورده‌های لبنی، و همچنین اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع می‌باشند. روغن‌های گیاهی به دلیل تجدیدپذیر، قابل دسترس، فراوان و ارزان بودن، اولویت بیشتری دارند. بیش از ۳۵۰ گونه گیاهی شناخته شده برای تولید روغن وجود دارد. محصولات روغنی چند ساله (برخی یکساله) در مناطق تپه ای نیز قابل کشت دارند. قابلیت تولید روغن بادام زمینی، کلزا، سویا، زیتون، تخمه آفتابگردان، بذر کتان و نخل به خوبی شناخته شده است؛ اما در حال حاضر، تمایل به کشت گیاهان چندساله به جای گیاهان یکساله مانند: گیاه دانه روغنی و نخل برای تولید روغن افزایش یافته است (Bart et al. 2010). در حال حاضر، بیودیزل عمدتاً از روغن سویا، روغن دانه آفتابگردان، روغن نخل و روغن کلزا به همراه روغن دانه آفتابگردان با اسید اولئیک بالا تولید می‌شود. دیگر منابع بیودیزل از گیاهان شامل روغن سویا، روغن کانولا، روغن نخل، روغن کلزا و روغن دانه آفتابگردان هستند؛ اما منابع حیوانی شامل چربی گوسفند، گوشت گاو و روغن‌های پخت و پز و روغن مرغ هستند. تولید بیودیزل همچنین با نارگیل، مغزناگیل، اندیروبا (گیاه کاراپا گویاننسس)^۱، بادام زمینی، روغن ماهی، ریزجلبک‌ها (کلرلا ولگاریس)، گیاه دانه روغنی کارکس، بادام، کاملینا (گیاه کاملینا ساتیوا)^۲ و ... آزمایش شده است (Pinto et al. 2005). روغن‌های گیاهی به دلیل سازگاری با محیط زیست، توجه محققان سراسر جهان را با مقادیر انرژی مشابه دیزل به خود جلب کرده‌اند. به عنوان مثال: بیوچربیها، روغن‌های گیاهی زائد، مواد اولیه روغن‌های گیاهی خالص (ریزجلبک‌ها، آفتابگردان، خردل، روغن نخل)، روغن‌های غیرخوراکی (روغن‌های جاتروفا، کرچک^۳

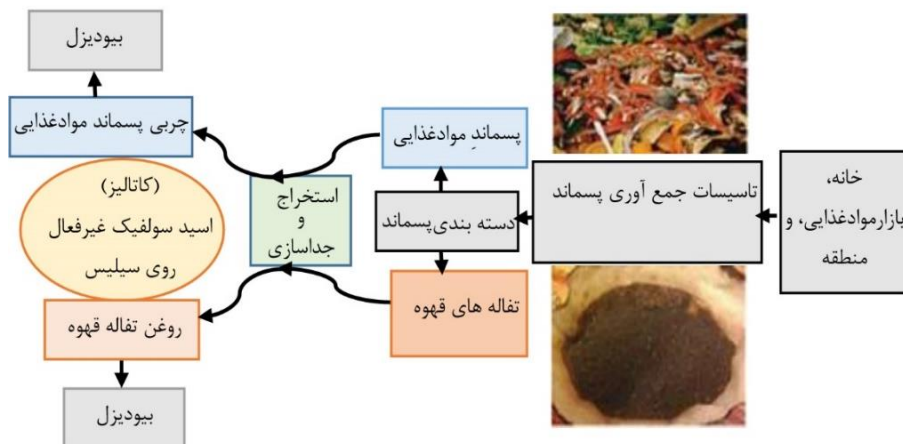
1. *Carapa guianensis*

2. *Camelina sativa*

3. *Castor*

و چریش^۱)، و چربی‌های حیوانی نیز می‌توانند برای تولید بیودیزل استفاده شوند (Sharma and Singh 2008). کشورهای در حال توسعه مختلف از محصولات مختلف تولید کننده روغن برای تولید بیودیزل استفاده می‌کنند (Srivastava and Verma 2008). به جز منابع گیاهی و حیوانی، برخی از گونه‌های جلبکی نیز قابلیت تولید بیودیزل را نشان داده‌اند. جلبک‌ها می‌توانند در حضور نور خورشید رشد کنند؛ و سرشار از تمام مواد مغذی ضروری (چربیها، اسیدهای نوکلئیک، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها) هستند. برخی از گونه‌های جلبک دارای زیست توده ای متشکل از ۴۰ درصد اسیدهای چرب هستند. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که عملکرد روغن جلبک ۲۰۰ برابر بیشتر از روغن‌های گیاهی است. ریزجلبک‌ها در حضور نور خورشید به سرعت رشد می‌کنند و چرخه رشد خود را در چند روز کامل می‌کنند. با این حال، تولید روغن بین گونه‌ها، متفاوت است. برخی گونه‌ها حدود ۵۰ درصد وزنی روغن تولید می‌کنند.

با این حال، پرورش جلبک‌ها برای تولید بیودیزل هنوز به مرحله تجاری نرسیده است؛ اما محققان در حال بررسی بر روی این مسئله هستند. برخی از انواع جدید خردل کشف شده‌اند. خردل برای استفاده به عنوان بیودیزل و همچنین آفت کش موثر هستند (Demirbas 2008). سوخت‌های زیستی مانند بیومتانول، بیودیزل، هیدروژن زیستی و بیواتانول برای نسل‌های آینده امیدوارکننده به نظر می‌رسد. سوخت‌های زیستی جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی متیل استرهای اسید چرب است (Shrirame et al. 2011). در حال حاضر، تقریباً ۳۵ درصد از نیاز جهانی به انرژی توسط نفت تأمین می‌شود؛ اما با افزایش جمعیت، پیوسته ذخایر نفت به سرعت تمام می‌شوند؛ و نیاز به منابع انرژی سازگار با محیط زیست مانند بیودیزل را بیشتر می‌کند. اصلاح شیمیایی روغن‌های گیاهی مستقیم با فرآیند ترانس استریفیکاسیون باعث تولید بیودیزل می‌شود. فرآیند ترانس استریفیکاسیون تبدیل اتانول یا متانول مخلوط با روغن‌های گیاهی مستقیم به استرهای اسیدهای چرب و همچنین گلیسرول تحت تأثیر یک کاتالیزور است (Panwar and Shrirame 2009). در سطح صنعتی، فرآیند ترانس استریفیکاسیون چربی‌های حیوانی و روغن‌های گیاهی به تولید متیل استرهای اسید چرب منجر می‌شود (بیودیزل) (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵. تولید بیودیزل از پسماند مواد غذایی (برگرفته از Karmee 2017)

رشد روزافزون جمعیت انسانی و همچنین رشد صنعتی نیاز به چربی‌ها و روغن‌های گیاهی را افزایش داده است؛ و به همین دلیل تولید روغن از گیاهان جایگزین الزامی شده است. مرکبات (گیاه سداب از تیره مرکبات) حدود ۱۳۰۰ گونه شناخته شده دارد؛ و یکی از مهم ترین گیاهان زراعی است. این گیاه در سرتاسر کره زمین با فواید فراوان کشت می‌شود. پسماند مرکبات شامل دانه ها، الیاف و پوست است. همه اجزاء پسماند مرکبات می‌توانند برای تولید محصولات جانبی مفید استفاده شوند. دانه‌های مرکبات ۴۰ تا ۸۰ درصد از وزن روغن را تشکیل می‌دهند (Bull and Obunwo 2014). سارنو و پونتیکوروو (2020) به بررسی روشی الکتروکاتالیستی پرداختند. این الکتروکاتالیست شامل یک نانوکاتالیست (آلیاژ سه فلزی Pt، Ir و Ru ((PtIrRu)) برای تولید بیودیزل از پسماندهای دانه لیمو بود. آن‌ها از یک روش الکتروکاتالیستی ساده با مخلوط واکنش متانول (محلول آبی) با استفاده از ولتاژ کم استفاده کردند؛ و تأثیر دما، ولتاژ، نسبت متانول به روغن، مقادیر آب، زمان واکنش و مقادیر NaCl بر عملکرد متیل استرها را با آزمایش‌های پایداری^۱ بررسی کردند. آن‌ها متوجه شدند که دما تأثیر بسیار کمی بر میزان تبدیل متیل استرها دارد. آن‌ها در دمای ۲۰ ولت به وسیله آلیاژ سه فلزی Pt، Ir و Ru به عنوان کاتالیزور، بازده تقریباً ۹۰ درصد بیودیزل از دانه‌های لیمو به دست آوردند. استفاده از ولتاژهای بالاتر باعث کاهش بازده تولید می‌شود؛ زیرا واکنش‌های

۱. آزمایش پایداری یک محصول به این معنی است که محصول چه مدت می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی شکل اصلی خود را بدون تغییر قابل مشاهده حفظ کند.

دیگر (قلیایی شدن و تبدیل به هیدروژن) می‌توانند موجب اختلال در فرآیند شوند (Larichev 2008). افزایش در بازده متیل استرهای اسید چرب در ولتاژ ۲۰-۵ ولت به دلیل دو عامل است. اولاً، افزایش ولتاژ باعث افزایش آزادسازی یون‌های هیدروکسیل می‌شود که در سطح متانول واکنش نشان می‌دهند. دوماً، این یون‌های هیدروکسیل باعث افزایش ترانس استریفیکاسیون می‌شوند. NaCl همچنین با افزایش نسبت مولی متانول به روغن باعث افزایش عملکرد می‌شود، اما غلظت بیش از حد NaCl می‌تواند منجر به کاهش بازده متیل استرهای اسید چرب شود (Lotero et al. 2005). در صورت افزایش زمان الکترولیز، بازده متیل استرهای اسید چرب نیز افزایش می‌یابد. بیودیزل به دست آمده از روغن دانه لیمو از آلفا-لینولنیک متیل استر تشکیل شده است. این واقعیت ثابت شده است که بیودیزل سوخت زیست تخریب پذیر، غیرسمی و اکسیژن دار است. بیودیزل ظرفیت جایگزینی سوخت‌های نفتی را دارد؛ اما تولید آن با روش‌های شیمیایی اثرات جانبی دارد؛ زیرا این روش‌ها خورنده و سمی هستند (Teo et al. 2014). کاتالیزور همگن قیمت فاضلاب تولید شده از مخلوط واکنش را افزایش می‌دهد (Abdullah et al. 2017)، اما کاتالیزور جامد ناهمگن دارای مزایایی است. این کاتالیزور در استرها نامحلول است؛ بنابراین می‌توان از آن مجدداً استفاده کرد (Wang et al. 2013a, b, c). شیمی سبز بر استفاده از کاتالیزورهای ناهمگن قابل استفاده مجدد و سازگار با محیط زیست، به عنوان مثال، کربن‌های سولفونات و زیرکونیای سولفات‌ها تأکید کرده است (Nakajima and Hara 2012). استفاده از مواد زائد برای تولید کاتالیزورهای قلیایی و اسیدی با کربن فعال توجه زیادی به خود جلب کرده است؛ و محققان از انواع مواد زائد (خاکستر چوب، پوسته نارگیل، پوسته نخل) برای این منظور استفاده کرده‌اند (Konwar et al. 2014). استفاده از کربن فعال به عنوان کاتالیزور مزایای زیادی دارد؛ زیرا دارای سطح و منافذ بیشتری است که برای کاتالیز موثر مفید هستند. تولید این کاتالیزور نیازمند واکنش شیمیایی و دماهای کربنیزاسیون بالا است؛ بنابراین کاتالیزورهای ناهمگن با استفاده از CaO از محبوبیت بیشتری برخوردار هستند. آنها را می‌توان به راحتی از پسماند (پوسته زائد خرچنگ، پوسته تخم مرغ) تولید کرد (Shankar and Jambulingam 2017). ترانس استریفیکاسیون در حضور کاتالیزورهای ناهمگن منجر به غیرفعال شدن کاتالیزور با گذشت زمان و موجب رسوب، متوقف شدن، از بین رفتن و تبدیل به زغال سوخته می‌شود. کاتالیزورهای ناهمگن باید آبگریز باشند؛ تا باعث جذب تری گلیسیرید شوند. بنابراین باید از غیرفعال شدن محل کاتالیزور توسط جذب محصول جانبی قطبی (آب و گلیسرول) خودداری شود. استفاده از فلزات به عنوان کاتالیزور می‌تواند این مشکل را حل کند (Osman et al. 2017). تولید کاتالیزورهای سازگار با محیط زیست و غیر سمی با تراکم

نوناگل^۱ (روش تشکیل پیوند C-C) با استفاده از زیرکونیوم متخلخل و همچنین رزین‌های تبادل یونی توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Dewan et al. 2018). گیاه خربزه درختی در بسیاری از کشورهای گرمسیری و نیمه گرمسیری رشد می‌کند؛ و منبع غنی ویتامین ها، مواد معدنی و انرژی هستند. گیاه خربزه درختی در تولید بسیاری از محصولات دارویی به کار گرفته شده است (Kokila et al. 2016). گوهین و همکاران (2020) برای اولین بار استفاده از ساقه گیاه خربزه درختی را به عنوان بیوکاتالیست ناهمگن پیشنهاد کردند؛ زیرا مقرون به صرفه، غیرسمی، قابل استفاده مجدد، سازگار با محیط زیست، تجدیدپذیر و مناسب برای واکنش تراکم نوناگل (ترانس استریفیکاسیون) است. تبدیل روغن به متیل استرهای اسید چرب به شدت به نسبت مولی الکل به روغن، کیفیت روغن و خواص کاتالیزور بستگی دارد (Meher et al. 2006a, b). مطالعات گزارش داده اند که هرچه نسبت متانول به روغن بالاتر باشد، نرخ تبدیل بالاتر است. با این حال، میزان بالای متانول می‌تواند با تشکیل متوکسید، که باعث ترانس استریفیکاسیون معکوس می‌شود، عملکرد ترانس استریفیکاسیون را مهار کند. گوهین و همکاران (2020) تبدیل پسماند روغن پخت و پز تحت تأثیر ساقه گیاه خربزه درختی به متیل استرهای پسماند روغن پخت و پز را بررسی کردند؛ و دریافتند که نسبت مولی متیل الکل به روغن ۹:۱ برای این فرآیند بهینه است. آنها پیشنهاد کردند که با افزایش مقدار کاتالیزور، تعداد مکان‌های فعال (پس از گذشت زمان مشخص) و سپس نرخ تبدیل، ثابت یا کم می‌شود؛ زیرا میزان قلیایی شدن شروع می‌شود (Kumar et al. 2018). سرعت تبدیل معمولاً در طول اولین واکنش ترانس استریفیکاسیون به دلیل تبدیل کند تری گلیسرید به متانول آهسته است؛ اما با افزایش این واکنش، تولید استرهای متیل اسید چرب نیز افزایش می‌یابد؛ تا زمانی که وارد حالت تعادل شود (Sirisomboonchai et al. 2015). نتایج طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای تأیید کرده است که پسماند روغن خوراکی مصرفی سرشار از پروتون‌های گلیسرید است. پروتون‌های گلیسرید پس از واکنش ترانس استریفیکاسیون در متیل استرهای پسماند روغن خوراکی مصرفی حذف می‌شوند. وجود کربن متوکسی متیل استرها در متیل استرهای پسماند روغن خوراکی مصرفی، تبدیل کامل پسماند روغن پخت و پز به بیودیزل را تأیید میکند (Betiku et al. 2016). تولید بیودیزل از چربی جلبک سندسموس آبلیک با ساقه گیاه خربزه درختی به عنوان کاتالیزور منجر به عملکرد بسیار بالاتری شد؛ و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متیل استرهای پسماند روغن خوراکی مصرفی مطابق با استانداردهای متیل استرهای اسید چرب است. مواد اولیه چربی برای تولید بیودیزل

۱. واکنشی در شیمی آلی است که به افتخار شیمیدان آلمانی امیل نوناگل نامگذاری شده است.

را می‌توان به عنوان روغن خوراکی/غیرخوراکی، پسماند/روغن مصرف شده و پسماند حیوانی طبقه بندی کرد. در دسترس بودن مواد خام، مقادیر روغن و گونه‌های گیاهی همراه با دوره برداشت از عوامل ضروری برای تولید بیودیزل هستند. در دسترس بودن مواد اولیه به شرایط آب و هوا، بافت خاک و روشهای کشاورزی بستگی دارد. مواد اولیه متداول از گیاهان تولید کننده روغن مانند: آفتابگردان، سویا، گیاه کلزا و نخل تهیه می‌شود. این گیاهان به دلیل مقادیر اسیدهای چرب آزاد کمتر، عملکرد بالاتری دارند (Baskar and Aiswarya 2016). در چند سال اخیر، بیودیزل حاصل از گیاهان غیرخوراکی روغن (گیاه دانه روغنی کارکس، گیاه زیبابرگ ساحلی^۱، گیاه کائوچو^۲، درخت گز روغنی^۳) جذابیت زیادی پیدا کرده است (Arumugam et al. 2018). گیاه سیبا پتاندرا که معمولاً به عنوان کاپوک یا درخت پنبه ابریشم شناخته می‌شود، درختی است که در بسیاری از کشورهای گرمسیری یافت می‌شود. روغن به دست آمده از دانه‌های پنبه ابریشم نه تنها به عنوان سوخت استفاده می‌شود، بلکه در صابون ها، رنگ ها و ... نیز استفاده می‌شود (Lim 2012). بسیاری از محققان قابلیت روغن گیاه سیبا پتاندرا را در تولید بیودیزل همراه با مواد اولیه مختلف آزمایش کرده اند. بالاجی و نیجو (2020) تولید بیودیزل از ساقه موز را هنگامی که به عنوان مواد اولیه توسط واکنش استریفیکاسیون و فرآیند ترانس استریفیکاسیون استفاده می‌شود، بررسی کردند. کاتالیزورهای به دست آمده از زیست توده در چند سال اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. کاتالیزور از جنس خاکستر از زیست توده هایی، مانند: خاکستر پوسته برنج، خاکستر چوب، خاکستر پوسته بادام زمینی، خاکستر ساقه زیرزمینی گیاه موسا بالیسیانا^۴ و خاکستر پوست و ... به دست می‌آید (Gohain et al. 2017). موز به طور گسترده ای در سراسر جهان کشت می‌شود. اگرچه ساقه موز هیچ ارزش تجاری ندارد؛ اما یک منبع غنی از مواد معدنی مانند سدیم، فسفر، کلسیم، پتاسیم، سی و منیزیم است (Pazmino-Hernandez et al. 2017). مطالعات بسیار کمی در مورد قابلیت ساقه موز در تولید زغال زیستی^۵ در دسترس است. بالاجی و نیجو (2020) ساقه‌های موز را جمع آوری کردند و یک کاتالیزور ناهمگن با روغن گیاه سیبا پتاندرا برای تولید بیودیزل تهیه کردند. آنها گزارش دادند که وقتی غلظت کاتالیزور افزایش می‌یابد، عملکرد متیل استرهای اسید چرب نیز به دلیل حضور K₂O در کاتالیزور ساقه موز خشک شده افزایش می‌یابد. وقتی خاکستر به دست آمده از پوسته برنج به عنوان کاتالیزور استفاده شد،

1. *Calophyllum inophyllum*2. *Hevea brasiliensis*3. *Moringa oleifera*4. *Musa balbisiana* Colla underground stem

۵. زغال تهیه شده از زیست توده‌های گیاهی و پسماند کشاورزی است

تولید بیودیزل بیشتر بود. بتیکو و همکارانش (2016) همچنین در هنگام افزایش غلظت کاتالیزور به دلیل افزایش در دسترس بودن مکان‌های فعال، بازده متیل استرهای اسید چرب بالاتر را به دست آورد؛ اما در هنگام افزایش زمان واکنش با ورود واکنش به مرحله تعادل، میزان بازده کاهش یافت. واکنش دهنده‌ها و اکسیدهای معدنی ساقه موز خشک شده به تولید استرهای متیل اسید چرب بالاتر منجر می‌شوند. پاتاک و همکاران (2018) اثر خاکستر حاصل از پوست گیاه موسی/کومیناتا را به عنوان یک کاتالیزور بررسی کرد؛ و بازده بالاتری از بیودیزل به دست آورد. با این حال، افزایش نسبت مولی متانول به روغن منجر به کاهش عملکرد متیل استرهای اسید چرب می‌شود؛ زیرا الکل اضافی می‌تواند غلظت کاتالیزور را رقیق کند. مندونسا و همکاران (2019) کاهش در بازده بیودیزل را زمانی که نسبت مولی متانول به روغن با خاکستر به عنوان کاتالیزور افزایش یافت، گزارش کردند. آنها تأثیر زمان واکنش را بر واکنش ترانس استریفیکاسیون شدن روغن سویا با پوست درخت توکوما^۱ به عنوان کاتالیزور بررسی کردند. همچنین، آنها مشاهده کردند که هر چه زمان واکنش کوتاه‌تر باشد، تولید متیل استرهای اسید چرب بیشتر است. گیاه کولا لپیدوتا^۲، که معمولاً با نام کولا میمون زرد^۳ شناخته می‌شود، یک میوه وحشی خوراکی از جنگل‌های مرکزی و غربی آفریقا با ارزش غذایی بالا است (Ogbu and Umeokechukwu 2014). مطالعات نشان داده است که این میوه دارای چندین ترکیب فعال زیستی مانند ساپونین‌ها، پلی فنول‌ها، آنتراکینون‌ها و آلکالوئیدها بوده و دارای خواص دارویی دیگری نیز می‌باشد. اوبی و همکاران (2020) قابلیت روغن گیاه لپیدوتا را برای تولید بیودیزل با خاک رس به عنوان یک کاتالیزور با واکنش ترانس استریفیکاسیون بررسی کردند. در طول واکنش ترانس استریفیکاسیون، روغن داغ با بوتوکسید مخلوط شد؛ و زمان ماند ۲۴ ساعت بود؛ سپس بیودیزل از گلیسرول حذف شد. گلیسرول سنگین تر در پایین جمع می‌شود. بازده بیودیزل به طور قابل توجهی مناسب بود. ویسکوزیته هر سوخت به خاصیت روان کنندگی آن مرتبط است؛ به عبارتی، سوخت‌هایی با ویسکوزیته پایین توانایی خوبی در روان کردن دارند؛ اما ممکن است منجر به نشت شوند. با این حال، سوخت‌هایی با ویسکوزیته بالا منجر به افزایش انتشار آگروز، احتراق ناقص و ضربه زدن به موتور می‌شود (Wang et al. 2006). شاخص نفت آمریکا برای تعیین مناسب بودن بیودیزل برای مقاصد صنعتی و خانگی بسیار مهم است. چگالی بیودیزل را در نسبت به آب اندازه گیری می‌کند. به عنوان مثال: اگر شاخص نفت آمریکا بزرگتر از ۱۰ باشد، وزن آن سبک تر است؛ و روی سطح آب شناور می‌شود؛ اما اگر این مقدار کوچکتر از ۱۰ باشد، سنگین است و ته نشین

1. Tucuma

2. *Cola lepidota*

3. Yellow monkey cola

می‌شود. بیودیزل به دست آمده توسط اوبی و همکاران (2020) متناسب با مقادیر استاندارد شاخص نفت آمریکا است؛ و برای مناطق با شرایط نامناسب آب و هوا، بهینه است. پسماند پوست پرتقال محصول جانبی آب پرتقال است؛ و به عنوان ماده اولیه برای تولید محصولات با ارزش مانند اتانول و مکمل برای کشت میکروبی استفاده می‌شود (Santi et al. 2015). پسماند پوست پرتقال سرشار از دی لیمون (مونوترپن حلقوی) می‌باشد؛ و از رشد مخمر جلوگیری می‌کند؛ و همچنین دارای ارزش تجاری به عنوان عامل پیشگیری از سرطان، طعم دهنده و ... است (Espina et al. 2011). پسماند پوست پرتقال (بدون لیمون) می‌تواند به عنوان منبع قند عمل کند؛ زیرا استخراج آب پسماند پوست پرتقال فروکتوز، ساکارز و گلوکز را استخراج می‌کند؛ و این محصول عصاره پوست پرتقال نامیده می‌شود (Santi et al. 2015). کاروتا و همکاران (2020) یک محیط مایع ترکیب شده با عصاره پوست پرتقال را برای تولید چربی و رشد ۱۸ سویه مخمر آزمایش کردند. عصاره پوست پرتقال به عنوان ماده اولیه برای تولید چربی توسط سویه‌های مخمر روغنی آزمایش نشده است؛ اما مطالعات روی قارچ‌های رشته‌ای و جلبک با عصاره پوست پرتقال انجام شده است (Carota et al. 2018). بر اساس مطالعات اخیراً پسماند پوست پرتقال پرمصرف ترین پسماند روی زمین هستند؛ زیرا با روش‌های مفید در پالایشگاه‌های زیستی مبتنی بر آب کاربرد دارند (Carota et al. 2017). پسماند پوست پرتقال با ارزش برای استخراج دی لیمون، آنزیم‌های پکتولیتیک، پکتین، بیواتانول و اسید سیتریک استفاده می‌شود (Espina et al. 2011). برخی از محققان قابلیت عصاره پوست پرتقال را برای تولید بیودیزل و پکتین آزمایش کرده اند (Park et al. 2014). کاروتا و همکاران (2020) گزارش داد که عصاره پوست پرتقال می‌تواند به عنوان پیش نیاز در تولید بیودیزل توسط سویه‌های مخمر روغنی با حداقل تغییرات در pH محیط و ترکیب نیتروژن معدنی استفاده شود. عصاره پوست پرتقال همراه با منبع نیتروژن (سولفات آمونیوم) ارزان و آسان تأثیر مثبتی بر زیست‌توده مخمر و تجمع چربیها دارد (Leiva-Candia et al. 2014). عصاره پوست پرتقال دارای فنل کم است. بیشترین مقادیر عصاره پوست پرتقال شامل نارینگنین، نارینژین و هسپریدین است. مخمر *تریکوسپورون فرمنتان* NRRL Y-1492 و مخمر *کریپتوکوکوس کورواتوس* NRRL Y-1511 تنها سویه‌های مخمری گزارش شده هستند که تجمع چربی بیش از ۲۰ درصد از زیست توده خشک را دارند (Karamerou and Webb 2019). در شرایط کاهش نیتروژن، سنتز زیستی مجدد چربی رخ می‌دهد که می‌تواند

بر فرایند لیپوژنز^۱ تأثیر بگذارد؛ زیرا پلی ساکاریدها به منظور تأمین انرژی برای فعالیت متابولیکی سلول‌های مخمر سنتز می‌شوند (Dourou et al. 2017). چاکوتنه و همکاران (2015) پیشنهاد کرد که برای مخمر کارنوباکتریوم کروا/توس NRRL Y-1511، ترکیب ساکارز انتخاب خوبی نیست؛ زیرا نتایج خوبی هرگز به دست نیامده است. مخمر کریپتوکوکوس لورتی UCD 68-201 و مخمر رودوسپوریوم تورولوییدس NRRL Y-1091 هنگامی که روی یک محیط حاوی عصاره پوست پرتقال کشت می‌شوند، منجر به تجمع چربی بالاتری می‌شوند. مخمر رودوسپوریوم تورولوییدس NRRL Y-1091 تجمع چربی بیشتری نسبت به مخمر کریپتوکوکوس لورتی UCD 68-201 نشان داد. مخمر رودوتورولا تورولوییدس NRRL Y-1091 و همچنین مخمر رودوتورولا تورولوییدس DSM 4444 می‌توانند به سرعت از قندهای موجود در محیط همراه با عصاره پوست پرتقال استفاده کنند؛ و چربی را ذخیره کنند. مخمر کریپتوکوکوس لورتی UCD 68-201 کشت شده روی محیط عصاره پوست پرتقال، فقط پس از کاهش گلوکز، می‌تواند از ساکارز و فروکتوز استفاده کند. این سویه می‌تواند از منابع مختلف کربنی استفاده کند (Tsakona et al. 2019). کاروتا و همکاران (2017) اثر آب پنیر ریکوتا^۲ را به عنوان منبع چربی بر رشد مخمر کریپتوکوکوس لورتی UCD 68-201 و مخمر رودوتورولا تورولوییدس NRRL Y-1091 در یک راکتور مخزن فعال آزمایش کردند. از آنجایی که هر دو سویه برای تجمع چربی شناخته شده اند، مشخص شد که کاهش سطح نیتروژن باعث کاهش غلظت آدنوزین مونوفسفات در سلول‌ها می‌شود. این امر منجر به تجمع تری گلیسرول می‌شود. کاهش حجم کربن و نیتروژن در محیط باعث افزایش زیست توده می‌شود؛ اما تجمع چربی‌ها کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی نیز برای مخمر رودوتورولا تورولوییدس DSM 4444، مخمر امبلوپسیس اینزابلینا^۳ و مخمر یارویا لیپولیتیکا^۴ گزارش شده است (Papanikolaou et al. 2017). گزارش شده است که کمبود کربن در محیط رشد می‌تواند منجر به تخریب جزئی چربی‌های ذخیره شده به منظور تولید انرژی مورد نیاز برای نگهداری سلولی برای سنتز پیش سازهای چربی جدید در میکروب‌های روغنی شود (Dourou et al. 2017). دورو و همکاران (2018) اخیراً گزارش داده اند که

۱. فرایندی است که طی آن، کربوهیدرات‌ها خون (به‌ویژه پس از خوردن یک خوراکی شیرین یا غذای پر قند) به اسید چرب و سپس به تری گلیسرید یا چربی‌های دیگر تبدیل می‌شود.

۲. ریکوتا یک نوع پنیر ایتالیایی است که معمولاً از شیر گوسفند و گاو به وسیله باقی‌مانده آب پنیر پس از تولید پنیر تهیه می‌شود.

3. *Umbelopsis isabelina*

4. *Yarrowia lipolytica*

دستکاری مسیر مولکولی می‌تواند منجر به افزایش تولید چربی‌های میکروبی^۱ در میکروب‌های دارای ساختار روغنی شود. عملکرد متیل استرهای اسید چرب مخمر *Rhodotorula toruloides*^۲ و مخمر *Cryptococcus laurentii*^۳ نشان می‌دهد که چربیهای آنها از ۱۶ و ۱۸ زنجیره کربنی اسیدهای چرب اشباع و تک اشباع تشکیل شده است (Carota et al. 2017). اسیدهای چرب اشباع شده با زنجیره بلند و اسید اولئیک اجزای اصلی بیودیزل مخمر *Rhodotorula toruloides* هستند. و مخمر *Cryptococcus laurentii* از نظر ترکیب چربی شبیه گیاه دانه روغنی *کارکس* و روغن *نخل آفریقایی* هستند. تولید چربیها از گونه‌های مخمر روغنی امیدوارکننده است؛ اما سویه‌های بسیار کمی برای این منظور بررسی شده است. استفاده از عصاره پوست پرتقال برای تولید چربی از مخمرهای روغنی دارای مزایای خاصی نسبت به سایر پسماند غذایی دارد؛ زیرا نیازی به پردازش‌های پیچیده آنزیمی و شیمیایی ندارد. اشکال عمده عصاره پوست پرتقال وجود دی لیمون است، اما استفاده از پسماند پوست پرتقال بدون لیمون می‌تواند این مشکل را حل کند (Santi et al. 2015).

۴-۳-۱ عوامل موثر بر تولید بیودیزل

عوامل متعددی یعنی دما، نسبت مولی، مقادیر آب، مقادیر اسید چرب آزاد و فشار بر عملکرد بیودیزل تأثیر می‌گذارند. با افزایش دما، میزان واکنش فشار نیز افزایش می‌یابد. بازده متیل استر بسیار تحت تأثیر نسبت مولی الکل به روغن گیاهی و همچنین دمای واکنش در طول فرآیند ترانس استریفیکاسیون است.

الف) نسبت مولی:

گزارش شده است که بازده آلکیل استر با افزایش نسبت مولی روغن به الکل افزایش می‌یابد. ساهو و همکارانش (2007) پیشنهاد کرد که نسبت مولی روغن گیاهی به الکل ۹:۱ در طول واکنش استریفیکاسیون قلیایی و نسبت مولی ۶:۱ در طول استریفیکاسیون اسیدی برای تولید بیودیزل از اسیدهای چرب آزاد با روغن دانه پولاتگا^۴ و روغن دانه لاستیکی^۵ به عنوان بستر

۱. از دسته تری گلیسیرید ها هستند که در موقعیت Sn-2 گلیسرول، اسید های چرب بلند زنجیر غیر اشباع و در موقعیت Sn-1 و

Sn-3 اسیدهای چرب اشباع و غیر اشباع قرار می گیرد.

2. *R. toruloides*

3. *C. laurentii*

4. Polanga seed oil

۵. درخت لاستیک بومی آمریکای جنوبی است و دانه های آن حاوی مقادیر قابل توجهی روغن است.

مناسب است. با این حال، ولکوویچ و همکاران (2006) پیشنهاد کردند که نسبت مولی ۶:۱ در طول واکنش استریفیکاسیون قلیایی و نسبت مولی ۱۸:۱ در طول فرآیند ترانس استریفیکاسیون اسیدی منجر به بازده بیودیزل بالاتری می‌شود. مهر و همکاران (2006a, b) گزارش کردند که نسبت مولی ۱۲:۱ در طول واکنش استریفیکاسیون قلیایی و نسبت مولی ۶:۱ در طول واکنش استریفیکاسیون اسیدی منجر به بازده بیودیزل بالاتر می‌شود. تیواری و همکاران (2007) در مورد ظرفیت برای اندازه گیری تأکید کردند و گزارش دادند که هرچه نسبت مولی بالاتر باشد، تولید استر بیشتر است.

(ب) دما:

بازده تبدیل استر با افزایش دمای واکنش افزایش می‌یابد. در مورد قلیاها (NaOH, KOH)، دمای فرآیند ترانس استریفیکاسیون بین ۳۱۸ تا ۳۳۸ کلوین فراهم می‌شود؛ زیرا دمای بالاتر می‌تواند باعث سوختن الکل شود؛ بنابراین بازده کمتری از بیودیزل به دست می‌آید. لئونگ و گو (2006) گزارش کردند که دمای بیش از ۳۲۳ کلوین می‌تواند بر عملکرد روغن خالص تأثیر منفی بگذارد؛ اما می‌تواند به دلیل ویسکوزیته متراکم بر پسماند روغن تأثیر مثبت بگذارد. افزایش دمای واکنش نزدیک به دمای فوق بحرانی^۱ می‌تواند نرخ تبدیل استر را افزایش دهد.

(ج) مقادیر آب و اسیدهای چرب آزاد:

اسیدیته روغن نباتی باید در طول واکنش ترانس استریفیکاسیون کمتر از ۱ باشد؛ زیرا اسیدیته کمتر می‌تواند اسیدهای چرب آزاد را خنثی کند. مقادیر آب بالا، می‌تواند باعث تشکیل کف و صابون شود؛ و صابون می‌تواند منجر به افزایش ویسکوزیته و تشکیل ژل/فوم شود؛ و جداسازی گلیسرول را دشوار کند (Ghadge and Raheman 2005). در ترانس استریفیکاسیون کاتالیزوری روغن گیاهی متداول، مقادیر آب نقش مهمی ایفا می‌کند. در تولید بیودیزل و اسیدهای چرب آزاد با ترانس استریفیکاسیون متعارف روغن/چربی‌های گیاهی، آب می‌تواند اثر منفی با تشکیل صابون داشته باشد. این امر می‌تواند اثر کاتالیزور را تغییر دهد؛ و در نتیجه بر کاتالیز اثر بگذارد. کوسدیان و ساکا (2004) پیشنهاد کردند که پیش نیاز مورد استفاده برای سنتز اسیدهای چرب آزاد باید بدون آب باشد؛ در حالی که کاناکسی و جریان (1999) تأکید کردند که آب ترانس استریفیکاسیون شدن روغن گیاهی را کاهش می‌دهد؛

۱. دمای فوق بحرانی به حالتی از ماده اشاره دارد که در آن خواص ماده بین حالت مایع و گازی است و نمی‌توان آن‌ها را به طور واضح از یکدیگر تفکیک کرد.

بنابراین بر تبدیل استر تأثیر می‌گذارد. اسیدهای چرب آزاد و آب موجود در ماده اولیه می‌توانند صابون را تشکیل دهند. تشکیل صابون باعث کاهش بازده آلکیل استر و همچنین تأثیر بر کارایی کاتالیزور می‌شود. با این حال، آب در طول جایگزینی متانول به متانول فوق بحرانی در دمای اتاق، تأثیر مثبتی بر بازده متیل استرها می‌گذارد؛ اما آب تأثیری بر فعالیت لیپاز ندارد (Demirbas 2006).

د) مقادیر کاتالیزور:

تحقیقات نشان داده است که حتی با اضافه کردن مقدار کمی CaO ، می‌توان تبدیل متیل استر از روغن آفتابگردان را افزایش داد. CaO به عنوان افزایش سرعت واکنش ترانس استریفیکاسیون شناخته شده است؛ اما افزایش بیش از حد در مقدار CaO تأثیر بسیار کمی بر بازده متیل استر می‌گذارد (Demirbas 2008).

۴-۴ بیوگاز

میزان استفاده از انرژی هر روز به شدت در حال افزایش است؛ و تقاضا برای منابع انرژی سازگار با محیط زیست نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا آنها به محیط زیست آسیب نمی‌رسانند. استفاده از پسماند غذایی و برنامه‌های مدیریت زباله شهری گزینه‌هایی هستند که در آنها می‌توان انرژی را از مواد زائد توسط فعالیت میکروبی تولید کرد؛ و بیوگاز یا متان را جمع‌آوری کرد. تولید بیوگاز یک فناوری مفید است؛ زیرا می‌تواند دو هدف را دنبال کند. یعنی تولید بیوگاز که می‌تواند به عنوان منبع انرژی استفاده شود؛ و مواد آلی باقی مانده که می‌تواند به عنوان کود استفاده شود. بیوگاز شکل پایداری از انرژی است. بیوگاز از پسماند تخریب شده گیاهی یا حیوانی غنی از دی اکسید کربن، متان، هیدروژن، نیتروژن و سولفید هیدروژن تولید می‌شود (Heb 2009). تولید متان از پسماند آلی زیست تخریب پذیر توسط هضم بی هوازی به ماهیت و مقدار مواد مورد استفاده برای هضم بستگی دارد. برای تولید متان از پسماند میوه و سبزیجات و کود دامی می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد؛ و رایج ترین روش‌ها شامل: هضم تک فاز/دو فاز، هضم مشترک و تخمیر خشک است (Chanakya et al. 2006). بازده متان را می‌توان با فرآیند هضم مشترک به دلیل پیوستگی ترکیبی بین میکروب‌ها و محیط برای رفع نیاز عناصر از دست رفته افزایش داد. بنابراین، پسماند میوه و سبزیجات، پسماند مواد غذایی و کود دامی را می‌توان با هضم مشترک برای بهبود تولید بیوگاز پردازش کرد. راکتور برای هضم مشترک به شرایط دما متوسط (۲۵-۴۰ درجه سانتیگراد) نیاز دارد؛ تا هزینه فرایند حرارتی را کاهش دهد. اگرچه بازده متان در دماهای بالا (۵۵ تا ۶۰ درجه

سانتیگراد) مناسب است؛ اما نگهداری راکتورها در این دماهای بالا کار آسانی نیست. درس و همکاران (2015) تولید بیوگاز از پسماند زیست تخریب پذیر را با روش هضم مشترک در هاضم بیوگاز بررسی کردند؛ و متوجه شدند که میزان رطوبت در گوجه فرنگی در مقایسه با نان بیشتر است. همچنین، در تمامی پسماندهای آزمایش شده با مقدار متنوعی از مواد جامد فرار، کمترین میزان رطوبت مربوط به گوجه است. ناند و همکاران (1994) پسماند گوجه فرنگی، انبه، آناناس، لیمو و پرتقال را آزمایش کردند؛ و نسبت مواد جامد فرار به طور قابل توجهی بالا بود. هر چه میزان رطوبت در زباله‌های آلی بیشتر باشد، فرآیند هضم بی هوازی بهتر است. پسماند میوه و سبزیجات و کود دامی درصدهای قابل توجهی از کل مواد جامدات، مواد جامد فرار و مقادیر مخلوط را دارند (Deressa et al. 2015). پسماند میوه و سبزیجات هنگامی که با کود دامی برای هضم مشترک مخلوط می‌شوند دارای pH بین ۶ تا ۷/۲ هستند. این بازه pH برای تولید بیوگاز مناسب است؛ زیرا میکروب‌ها در این محدوده PH آسیب نمی بینند؛ و بازده بیوگاز دائمی به دست آمد (Chua et al. 2008). دمای فرآیند هضم مشترک معمولاً بین ۲۶ تا ۳۲ درجه سانتیگراد (شرایط دما متوسط) حفظ می‌شود که برای تولید بیوگاز مطلوب است. احتراق بیوگاز را میتوان با استفاده از چراغ بونزن^۱ به عنوان شعله در صورت شروع تولید بیوگاز آزمایش کرد. بازده بیوگاز به صورت نسبت کل جامدات/جامدات فرار بیان میشود؛ و اکنون مشخص است که پسماندهای میوه و سبزیجات مخلوط شده با کود دامی منجر به تولید بیوگاز بالا میشود. عدم احتراق بیوگاز می‌تواند در هضم کننده‌ها به دلیل عدم وجود مقادیر کافی از سوبیه‌های باکتری‌های متانوژن که متان را با تبدیل دی اکسید کربن و اسید استیک تولید می‌کنند، امکان پذیر باشد. جامدات ته نشین شده می‌تواند منجر به تشکیل پسماند در قسمت پایین هاضم شود. سوزاندن سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار گازهای گلخانه ای می‌شود. گازهای گلخانه ای تأثیر منفی بر محیط زیست دارد؛ بنابراین منابع انرژی تجدید پذیر می‌توانند به حل این مشکل کمک کنند. استفاده از پسماند میوه و سبزیجات، بخش آلی زباله‌های جامد شهری، لجن فاضلاب و کود نه تنها بیوگاز تولید می‌کند، بلکه دفع آنها را در محل‌های دفن زباله نیز کاهش می‌دهد (Di Maria et al. 2015). به نظر می‌رسد هضم بی هوازی یک فناوری امیدوارکننده برای تولید بیوگاز از پسماند میوه و سبزیجات و همچنین بخش آلی پسماندهای جامد شهری باشد؛ با این حال، نرخ تولید بیوگاز به دلیل زمان طولانی مورد نیاز برای تثبیت مواد آلی و کارایی حذف مواد جامد کم فرار پایین است. هضم بی هوازی می‌تواند تحت تأثیر تجمع اسیدهای چرب فرار و اسیدهای چرب زنجیره بلند که فعالیت

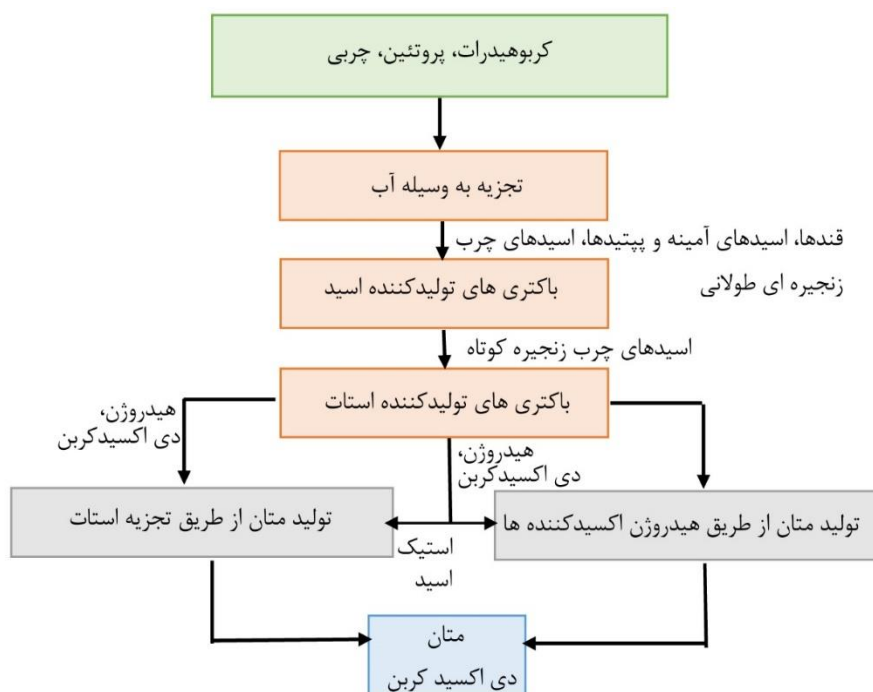
۱. یکی از ابزارهای آزمایشگاهی است که به عنوان منبع تولید حرارت و انرژی گرمایی در آزمایشگاه‌ها از آن استفاده می‌شود.

متانوژن‌ها را مهار می‌کنند، قرار گیرد (Borowski 2015). مقادیر قند بالای پسماند میوه و سبزیجات منجر به اسیدی شدن سریع زیست توده می‌شود. اسیدی شدن زیست توده فعالیت باکتری‌های تولیدکننده متان را مهار می‌کند (Scano et al. 2014). پسماند میوه و سبزیجات و بخش آلی زباله‌های جامد شهری که با هم برای هضم مشترک پردازش می‌شوند، نه تنها می‌توانند فرآیند هضم بی‌هوازی را تثبیت کنند، بلکه می‌توانند تولید بیوگاز را نیز افزایش دهند. انواع مختلف پیش‌نیاز مخلوط شده برای هضم مشترک، نسبت کربه به نیتروژن را متعادل می‌کنند؛ ظرفیت بافری هاضم را افزایش می‌دهند؛ بنابراین تولید بیوگاز و تجزیه زیستی زیست توده آلی را افزایش می‌دهند. محصول نهایی هضم مشترک می‌تواند به طور مستقیم به عنوان کود استفاده شود. بخش آلی پسماند جامد شهری به تنهایی یا در ترکیب با سایر زباله‌ها، مانند چربی، لجن فعال، کاه برنج، پسماند مواد غذایی، لجن فاضلاب و پسماند روغن و گریس، به عنوان یک ماده اولیه مناسب برای تولید بیوگاز در نظر گرفته می‌شود (Abudi et al. 2016). پایو و همکاران (2017) پسماند میوه و سبزیجات و بخش آلی زباله‌های جامد شهری را با لجن زیستی هاضم تحت دمای متوسط برای تولید بیوگاز آزمایش کردند. آنها گزارش دادند که پسماند میوه و سبزیجات و بخش آلی پسماند جامد شهری می‌تواند به طور کامل در طی هضم بی‌هوازی تبدیل شوند؛ و نسبت کربن به نیتروژن بستگی به نوع مواد و میزان مواد اولیه دارد. هضم مشترک باعث افزایش قلیائیت می‌شود؛ و در نتیجه هضم مشترک، فرایند اسیدی شدن پسماند میوه و سبزی در هنگام هضم کنترل می‌شود.

pH بالا، خاصیت محیط کشت و قلیایی بودن پارامترهای مهمی هستند. این پارامترها کارایی صحیح فرآیند هضم بی‌هوازی را فراهم می‌کنند. تجزیه بیولوژیکی پسماند میوه و سبزیجات با هضم بی‌هوازی با سرعت بیشتری نسبت به بخش آلی پسماند جامد شهری اتفاق می‌افتد؛ زیرا اولی از نظر مقادیر قند غنی‌تر است (Di Maria et al. 2014). بازده بیوگاز برای پسماند میوه و سبزیجات/ بخش آلی پسماند جامد شهری نسبت به پسماند میوه و سبزیجات یا بخش آلی پسماند جامد شهری به تنهایی با هضم مشترک بیشتر است (Pavi et al. 2017). پسماند میوه و سبزیجات و بخش آلی پسماند جامد شهری نسبت به این پیش‌نیاز به تنهایی مقادیر بیشتری از متان تولید می‌کنند؛ زیرا میکروب‌ها قادر به تامین متعادل مواد مغذی از این پسماند هستند (Huang et al. 2016). بوروسکی (2015) گزارش داد که مقادیر متان در بیوگاز تولید شده توسط هضم مشترک بخش آلی زباله جامد شهری / لجن فاضلاب بیشتر از بخش آلی هضم تک مرحله ای زباله‌های جامد شهری است. لین و همکاران (2011) مقادیر متان

بالاتری را در بیوگاز تولید شده توسط هضم مشترک پسماند میوه و سبزیجات/ پسماند غذا در نسبت ۱:۱ به دست آوردند. در فرآیند هضم بی هوازی، زیست توده آلی ترکیبی توسط میکروب‌های بی هوازی به دی اکسید کربن، متان و آمونیاک با گازهای دیگر در مقادیر کم تجزیه می‌شود.

در طول تخریب پسماند میوه و سبزیجات توسط هضم بی هوازی، اسیدی شدن خیلی زودتر اتفاق می‌افتد؛ زیرا pH کاهش می‌یابد؛ و منجر به تولید اسیدهای چرب فرار می‌شود. این اسیدهای چرب فرار، کارایی متانوژن‌ها را کاهش می‌دهد (شکل ۴-۶). بنابراین، تولید متان سرعت واکنش را در هضم بی هوازی پسماند میوه و سبزیجات تعیین می‌کند؛ زیرا متانوژن‌ها زمان دو برابر شدن طولانی تری دارند. پسماند موز به راحتی در دسترس هستند؛ و از نظر رطوبت غنی هستند؛ در نتیجه می‌توان از آنها در فرآیندهای تبدیل زیستی استفاده کرد (Bardiya et al. 1996). بسیاری از مطالعات قابلیت پسماند موز را به عنوان مواد اولیه مناسب برای تولید بیوگاز از طریق هضم بی هوازی گزارش کرده‌اند.



شکل ۴-۶. واکنش‌های هضم بی هوازی (برگرفته از Taghizadeh et al. 2017)

باقی مانده‌های این پسماند به عنوان کود عمل می‌کنند (El-Mashad and Zhang 2010). بیشتر پسماند میوه و سبزیجات دارای مواد آلی قابل تجزیه مانند جامدات فرار هستند. آنها دارای مقادیر کل جامد کمتری هستند؛ و به سرعت هیدرولیز می‌شوند. به همین دلیل، اسیدها تشکیل می‌شوند؛ و pH محیط کاهش می‌یابد. کاهش pH از فعالیت باکتری‌های تولیدکننده متان جلوگیری می‌کند. به طور کلی، تمام زباله‌های آلی دارای مقادیر کافی مواد مغذی هستند. این مواد مغذی، باعث رشد متانوزن‌ها می‌شود؛ و به تولید بیوگاز کمک می‌کند (Khan et al. 2013). بسیاری از مطالعات گزارش کرده‌اند که اختلاط مقادیر آلی پسماند میوه‌ها و سبزیجات با فضولات گاو منجر به عملکرد رضایت‌بخش بیوگاز می‌شود؛ زیرا محتویات بیوگاز صرفاً به مواد اولیه انتخابی بستگی دارد. بیوگاز از متان (جزء اصلی، ۷۰-۵۰ درصد)، دی اکسید کربن (۴۰-۳۰ درصد)، نیتروژن، هیدروژن و سولفید هیدروژن تشکیل شده است (Rahmat et al. 2014). بازده متان تا حد زیادی به نسبت کربن به نیتروژن ماده اولیه بستگی دارد. آبیّه (2017) گزارش داد که پسماند میوه و سبزیجات به تنهایی می‌توانند به عنوان ماده اولیه برای تولید بیوگاز بدون کود دامی و فضولات انسانی/ حیوانی عمل کنند؛ زیرا دارای نسبت کربن به نیتروژن متعادل هستند. این نسبت تعادلی کربن به نیتروژن به اندازه کافی برای متانوزن‌ها برای تولید بیوگاز توسط هضم بی‌هوازی موثر است. هضم بی‌هوازی باعث افزایش تولید بیوگاز می‌شود؛ اما با افزایش مقدار پسماند، سرعت تولید بیوگاز کاهش می‌یابد. مقادیر متان در بیوگاز نیز با شروع هضم بی‌هوازی افزایش می‌یابد؛ اما با آغاز تجمع پسماند در هضم کننده، ممکن است مقادیر متان در بیوگاز کاهش یابد؛ و دی‌اکسید کربن نسبت به متان افزایش یابد. بیوگاز به عنوان سوخت سبز نیز شناخته می‌شود؛ زیرا می‌تواند برای تولید برق، به عنوان سوخت و برای پخت و پز استفاده شود. به طور کلی، بیوگاز، از تجزیه بی‌هوازی مواد آلی (حیوانات مرده، گیاهان، مدفوع، و زباله‌های آشپزخانه) تولید می‌شود. برخی از کشورها از بیوگاز برای اهداف گرمایش و همچنین برای حمل و نقل استفاده می‌کنند. بیوگاز را می‌توان با تصفیه کردن به گاز طبیعی تبدیل کرد؛ تا با استانداردهای سوخت مطابقت داشته باشد. کوکر و همکاران (2008) مطالعه ای در مورد مقدار و نوع پسماند غذایی تولید شده توسط جمعیت یاروبا^۱، ایبادان (شهری در نیجریه) انجام دادند؛ و دریافت که ۶۲ درصد از پسماند غذایی از مواد غذایی آماده یا فرآوری شده تشکیل شده است. آنها پیشنهاد دادند که به جای دفن پسماند مواد غذایی در محل‌های دفن زباله، از آنها برای تبدیل به متان (بیوگاز) استفاده شود. بیوگاز می‌تواند به عنوان سوخت مورد استفاده قرار گیرد. پسماند مواد

۱. این جمعیت در شمال نیجریه زندگی می‌کنند.

غذایی به دلیل رطوبت بالایی که دارند، به عنوان ناقل بیماری عمل می‌کنند. همچنین، پسماند مواد غذایی بوهای نامطلوبی ایجاد می‌کنند. این بوهای نامطلوب می‌تواند با تبدیل آن به بیوگاز به حداقل برسد. از پسماند مواد غذایی می‌توان دو نوع گاز پاک (گاز متان و هیدروژن) به عنوان منبع انرژی استخراج کرد. این گازها می‌توانند برای راهاندازی وسایل نقلیه استفاده شوند (Schnepf 2007).

اوجیکوتو اییمبولا و اودوکوبا اولومید (2014) انواع مختلف پسماند مواد غذایی را برای تولید بیوگاز با روش هضم مشترک بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نوع پسماند غذایی تأثیر معنی‌داری بر بازده بیوگاز ندارد. آنها دریافتند که اختلاط پسماند مواد غذایی منجر به تولید بیوگاز با حداکثر راندمان می‌شود. بازده تولید بیوگاز در ۵ روز اول قبل از کندشدن سرعت، افزایش می‌یابد. زباله‌های آب اسفناج و موز هر روز از بازارها خارج می‌شوند؛ و در محل دفن پسماند تلنبار می‌شود؛ یا گاهی اوقات در تغذیه حیوانات استفاده می‌شوند. دفع آنها در محل‌های دفن زباله یک تهدید جدی برای محیط زیست است؛ زیرا خاک، آب و همچنین هوا را آلوده می‌کند؛ اما روش‌های تصفیه موثر می‌تواند این مشکل را حل کند (Scano et al. 2014). تجزیه زیستی پسماند آب اسفناج و موز در محل‌های دفن زباله منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و شیرابه به دلیل مقادیر بالای ترکیبات آلی می‌شود (Zhu et al. 2010). گیاه سنبل آبی (گونه/یچه‌ورنیا کرسیس)^۱ علف هرز آبی با سرعت رشد بالا است؛ اما رشد بیش از حد آن برای محیط آبی مضر است. اخیراً برخی گزارش‌ها نشان می‌دهد که زیست توده سنبل آبی به دلیل درصد کمی سلولز بالا می‌تواند به عنوان ماده خام برای تولید سوخت زیستی استفاده شود. هیدرولیز سنبل آبی منجر به تولید دی‌اکسید کربن و متان می‌شود؛ اما برخی مطالعات گزارش دادند که بازده متان هنوز به اندازه کافی بالا نیست؛ تا در سطح صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین تحقیقات بیشتری مورد نیاز است (Rittmann et al. 2008). سوپریانتو و همکاران (2021) کارایی پوست موز، اسفناج آبی و زیست توده سنبل آبی را برای تولید بیوگاز با روش‌های هضم مشترک بی‌هوازی و هضم بی‌هوازی بررسی کرد. آنها هر دو مواد اولیه در هاضم تک مرحله‌ای و هاضم مشترک را به درون هضم کننده بی‌هوازی وارد می‌کردند؛ و تولید بیوگاز را اندازه‌گیری می‌کردند. نتایج آنها نشان داد که تولید بیوگاز توسط هاضم تک مرحله‌ای مواد اولیه تا ۵ روز افزایش یافته و سپس ثابت شده است. در حالی که عملکرد بیوگاز از هضم مشترک مواد اولیه مخلوط بین ۵ تا ۲۴ روز با نوسانات در بازده به دلیل فعالیت میکروبی ثابت باقی مانده است. پاتیل و همکاران (2010) همچنین بازده بیوگاز بالاتری را از

1. *Eichhornia crassipes*

سنبل آبی در شرایط دمای متوسط به دست آوردند. گومز و همکاران (2006) هضم مشترک پسماند میوه و سبزیجات و لجن اولیه را در نرخ‌های بارگذاری آلی مختلف و شرایط اختلاط بررسی کردند؛ و گزارش کردند که تولید بیوگاز رضایت‌بخش بود. در حالی که حبیب و همکاران (2009) گزارش کردند که هضم مشترک لجن فعال و پسماند میوه‌ها و سبزیجات تولید بیوگاز را بهبود می‌بخشد. "افزودن سلول‌های میکروبی به محیط" نقش مهمی در راکتورهای هضم بی‌هوازی دارد؛ زیرا استفاده از "سلول‌های میکروبی" بسیار فعال می‌تواند منجر به تولید بیوگاز بیشتر شود. سعد و همکاران (2019) تأثیر انواع مختلف سلول‌های میکروبی افزوده شده به محیط را بر تولید هیدروژن و بیوگاز مطالعه کردند؛ و دریافتند که بازدهی بالا با لجن مخزن هوادهی به دست می‌آید. دنس (2015) سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط متشکل از کود دامی مخلوط با مایع سیرابی را با هضم بی‌هوازی برای تولید بیوگاز آزمایش کرد؛ و گزارش داد که افزایش غلظت سلول‌های میکروبی اضافه شده منجر به افزایش تولید بیوگاز می‌شود. هیدالگو و مارتین-ماروکین (2014) از سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط، متشکل از پسماند روغن گیاهی و کود خوک استفاده کردند؛ و آن را با باقیمانده‌های پسماند هتل‌ها، رستوران‌ها و غذاخوری‌ها (هورکا)^۱ هضم کردند؛ و بازده بالاتری از بیوگاز را یافتند. لی و همکاران (2011) سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط، متشکل از کود از فاضلاب لبنی و کود خوکی، ذرت و لجن شهری را با هضم بی‌هوازی آزمایش کردند؛ و بازده بیوگاز بالاتری را از کود خوکی به دست آوردند. فورستر-کارنیرو و همکارانش (2007) تولید بیوگاز از زباله‌های جامد شهری را با هضم بی‌هوازی در دمای ترموفیلی با شش نوع مختلف سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط (سیلاژ ذرت، پوسته برنج، لجن هضم شده، فضولات خوکی، فضولات خوکی مخلوط با لجن و فضولات گاو) آزمایش کردند؛ و دریافتند که تولید بیوگاز زمانی بالاتر بود که لجن هضم شده به عنوان سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط در نظر گرفته می‌شد. السید و همکاران (2020) هضم بی‌هوازی پسماند میوه و سبزیجات-لجن اولیه را با هضم آنها در نسبت‌های مختلف برای تولید بیوگاز بررسی کردند؛ و دریافتند که عملکرد بیوگاز از لجن اولیه به تنهایی بالاتر از پسماند میوه و سبزیجات است؛ زیرا اولی به راحتی از دومی تخریب می‌شود. بازده متان تجمعی از هر دو لجن اولیه و پسماند میوه و سبزیجات در دمای متوسط به مدت ۳۰ روز پیوسته بود. نانسوبوگا و همکاران (2015) گزارش دادند که اگر لجن اولیه و پسماند میوه و سبزی به نسبت مساوی هضم شوند، بازده متان بالاتر

۱. هورکا به عنوان یک اصطلاح تجاری در صنعت خدمات غذایی یا شرکت‌های فعال در این زمینه ها بکار برده می‌شود و مخفف

سه کلمه هتل، رستوران و کافه است.

است. در حالی که هیو و همکارانش (2003) پیشنهاد کرد که اگر پسماند مواد غذایی و لجن فعال در نسبت‌های مساوی مخلوط شوند، بازده متان بالاتر است. کوچ و همکارانش (2016) گزارش داد که پسماند غذایی که با لجن خام هضم می‌شوند، منجر به تولید متان بالا از لجن به تنهایی می‌شود؛ زیرا تعادل مواد مغذی در راکتور فراهم می‌شود. هضم مشترک پسماند میوه و سبزیجات با لجن اولیه منجر به افزایش تولید متان می‌شود؛ زیرا فعالیت میکروبی به دلیل ماهیت بسیار زیست تخریب پذیر پسماند میوه و سبزیجات افزایش می‌یابد. گزارش‌های مشابهی توسط بسیاری از محققان به دست آمده است؛ به عنوان مثال، پان و همکاران (2019) گزارش دادند که پسماند مواد غذایی- لجن فاضلاب به نسبت مساوی باعث افزایش مقادیر متان در بیوگاز می‌شود؛ در حالی که جوگل سوخش و ونکاتسوارا راو (2019) گزارش دادند که هضم مشترک کود فاضلاب لبنی و کاه برنج منجر به بازده متان بالاتر می‌شود. اما عملکرد متان همیشه با هضم مشترک بالاتر نیست؛ به عنوان مثال، لیو و همکاران (2009) گزارش داد که هضم مشترک پسماند غذایی- پسماند سبز نسبت به هاضم تک مرحله ای مواد اولیه منجر به کاهش بازده می‌شود؛ زیرا عدم تعادل بین نسبت کربن به نیتروژن و مواد مغذی ضروری منجر به کاهش مواد جامد فرار و همچنین عملکرد متان می‌شود. مطالعات متعددی هضم سه گانه^۱ بی هوازی را آزمایش کرده اند که به نظر می‌رسد در ارائه مواد مغذی مساوی، بهبود ظرفیت دفع و علاوه بر این کاهش هزینه‌ها، نسبت به هضم مشترک بهتر است (Korai et al. 2018). زاهان و همکاران (2018) تولید بیوگاز را با هضم سه گانه پسماند غذا، کاه گندم و پسماند مرغ آزمایش کردند؛ و بازده بالاتری به دست آوردند. لی و همکاران (2020) اثر هاضم تک مرحله ای، هضم مشترک و هضم سه گانه را بر تولید متان از زباله‌های میوه و سبزیجات، پسماند غذایی و پسماند آشپزخانه ارزیابی کردند؛ و دریافتند که سه فرآیند هضم در مدت زمان کوتاهی فعال شد؛ زیرا هر سه نوع پسماند غنی از قند هستند. این پسماند به راحتی می‌توانند به متان تبدیل شوند. بازده بیوگاز در هاضم تک مرحله ای پسماند غذا پس از روز دوم به دلیل تغییرات pH (اسیدی) کاهش یافت؛ زیرا منجر به تجمع اسیدهای چرب فرار می‌شود؛ و تولید بیوگاز را مهار می‌کند؛ اما تنظیم pH به سطوح قلیایی دوباره بازده بیوگاز را افزایش داد. فاز اسیدی در هضم سه گانه پسماند مواد غذایی / پسماند آشپزخانه / پسماند میوه و سبزیجات مشاهده نشد، که نشان می‌دهد این روش ظرفیت بافری^۲ بالاتری نسبت به فرآیندهای هاضم تک مرحله‌ای و هضم مشترک دارد. وانگ و همکاران (2013a, b, c) اثر هضم سه گانه بر تولید بیوگاز از کود مرغ، ساقه برنج و کود گاوی را بررسی کردند؛ و بازده

1. tridigestion

۲. مقاومت در برابر تغییرات pH

بالاتری از بیوگاز را در مقایسه با روش‌های هاضم تک مرحله ای و هضم مشترک بدست آوردند. لی و همکاران (2019) همچنین بازده متان بالاتر از هضم سه گانه پسماند مواد غذایی، لجن فعال، و مخلوط پسماند باغچه به دست آمده، نشان می‌دهد که مواد اولیه، نسبت مخلوط کردن، و فرایندهای واکنش بر عملکرد بیوگاز تأثیر می‌گذارند. مقادیر متان بالاتر توسط هضم سه گانه را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که فعالیت باکتری‌های تولید کننده متان به اندازه کافی در هاضم‌ها رخ می‌دهد. این امر منجر به تبدیل کامل اسیدهای چرب فرار به متان می‌شود (Mu et al. 2020). کیم و همکاران (2019) گزارش کردند که افزایش غلظت پسماند مواد غذایی منجر به عملکرد بالاتر متان می‌شود. تانگ و همکاران (2020) کارایی هضم بی هوازی را با مصرف پسماند گیاهی به عنوان مواد اولیه و عوامل مؤثر بر هضم بی هوازی آزمایش کردند. آنها مشاهده کردند که در ابتدا، بازده بیوگاز بالا بود؛ اما مقادیر متان کم بود؛ اما بعد از مدتی عملکرد متان افزایش یافت. در شروع تخمیر، بازده متان به دلیل هیدرولیز پسماند گیاهی کم بود؛ اما بعد از مدتی فرآیند تخمیر وارد مرحله اسیدی شد. مرحله اسیدی باعث افزایش بازده متان می‌شود. دوس سانتوس و همکاران (2020) کارایی پوست میوه شور، بادام هندی و تفاله پرتقال را برای تولید بیوگاز از طریق هضم بی هوازی با لجن بی هوازی (لجن صنعتی و لجن فاضلاب) به عنوان سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط ارزیابی کردند. آنها کمترین بازده را از زیست توده مبتنی بر سلولز-لجن صنعتی-لجن فاضلاب شهری به دست آوردند؛ اما بازده بالاتر از تفاله پرتقال-لجن فاضلاب به دست آمد، این را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که تفاله پرتقال دارای لیگنین و همی سلولز بالا است. محتوا و نسبت کربن به نیتروژن بالا که هیدرولیز موثر را ممکن می‌سازد. و منجر به افزایش تولید متان می‌شود. رویز و فلوتا (2016) از پوست پرتقال که با کود گاو در شرایط دمایی متوسط پردازش شده بود، عملکرد متان بیشتری کسب کردند. نتایج مشابهی توسط مارتین و همکاران (2010) که پوست پرتقال را با لجن فاضلاب صنعتی در دمای متوسط پیش تصفیه کردند؛ و همچنین توسط کاروالو و همکاران (2017) که پوست پرتقال را با لجن فاضلاب شهری پیش تصفیه کردند و بازده بالاتری به دست آوردند، به دست آمد. آماده سازی غلظت دی-لیمون^۱ را کاهش می‌دهد. دی-لیمون برای باکتری‌های تولید کننده متان از نوع آرکی، سمی است. ژائو و همکاران (2016) بازده متان بالاتری را از پوست میوه شور مخلوط با لجن فاضلاب تحت دمای متوسط در سیستم متوالی به دست آورد. نتایج مشابهی توسط پرابودسای و همکاران (2013) به دست آمد که زیست توده مبتنی بر سلولز را با لجن فاضلاب تحت دمای متوسط با

۱. ماده اصلی تشکیل دهنده رایحه مرکبات

"افزودن سلول‌های میکروبی به محیط" متشکل از کود دامی، لجن و مایع سیرابی بز در راکتور بی‌هوازی با جریان روبه بالا تصفیه کردند. پسماند برداشت میوه و سبزیجات شامل ساقه، برگ، سبزیجات غیرقابل مصرف و میوه‌هایی است که لیگنوسلولز کمی دارند. این لیگنوسلولز قبل از تخمیر نیازی به آماده‌سازی پیچیده ندارند. گونران و همکارانش (2020) پیشنهاد کرد که ترکیب آماده‌سازی حرارتی شیمیایی با هضم بی‌هوازی می‌تواند تولید بیوگاز از زباله‌های برداشت میوه و سبزیجات را بهبود بخشد. آنها پسماند میوه‌ها و سبزیجات را خشک کردند؛ سپس آنها را به صورت پودر تبدیل کردند. در ادامه، پودرها را قبل از هضم بی‌هوازی در شرایط دمایی متوسط، با استفاده از اسید هیدروکلریک و هیدروکسید سدیم پردازش کردند. آنها دریافته‌اند که آماده‌سازی حرارتی بدون مواد شیمیایی منجر به بالاترین بازده متان می‌شود، اما کمترین عملکرد در مورد پسماند برداشت میوه و سبزیجات آماده‌سازی با هیدروکسید سدیم به دست می‌آید. می‌توان پیش‌بینی کرد که افزایش نسبت هیدروکسید سدیم باعث کاهش بازده متان می‌شود؛ زیرا افزایش نسبت هیدروکسید سدیم موجب تخریب شدن مولکول‌های قند تولیدی و افزایش تعداد یون‌های سدیم می‌باشد (Song et al. 2019). نتایج مشابهی از طریق پیش‌تصفیه با اسیدی هیدروکلریک به دست آمد. با افزایش غلظت اسید هیدروکلریک بازده متان کمتری به دست آمد. سونگ و همکاران (2014) اثر چهار روش مختلف اسیدی (HCl و CH_3COOH ، H_2SO_4 ، H_2O_2) و سه روش قلیایی (NaOH و Ca(OH)_2 ، $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) را بر تولید متان توسط کاه ذرت آزمایش کرد؛ و گزارش داد که هر دو روش آماده‌سازی تأثیر مثبتی بر عملکرد متان دارند؛ زیرا باعث حل شدن مواد آلی می‌شود؛ بنابراین در دسترس بودن مکان‌های فعال آنزیم را افزایش می‌دهند. موزیاریاسی و همکاران (2020) قابلیت پسماند بازار میوه، پسماند بازار گل، پسماند بازار سبزیجات، پسماند بازار گل فشرده شده، پسماند بازار سبزیجات و پسماند بازار میوه فشرده شده را برای تولید متان بررسی کردند. آنها دریافته‌اند که عملکرد متان برای زباله‌های بازار میوه‌های فشرده شده بالاترین است. این امر نشان می‌دهد وجود مواد آلی زیست‌تجزیه پذیر بالا است. این مواد آلی می‌تواند به سرعت هیدرولیز و به متان تبدیل شود. پسماند بازار گل نیز در مقایسه با سایر پسماند فشرده شده به دلیل مقادیر ماده خشک بالا منجر به افزایش بازده متان شد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فشرده‌سازی در افزایش بازده متان و همچنین کاهش زمان هضم موثر است. سوهارتینی و همکارانش (2020) تولید بیوگاز از زباله‌های کشاورزی صنعتی مبتنی بر میوه (کاه میوه ای از تیره انجیرها، موز، سیب، آناناس و پوست پرتقال) و باقی مانده‌های محصولات کشاورزی (کاه ذرت و برنج، شاخه‌های خالی از میوه درخت نخل روغن، زباله‌های گیاهی و پوسته قهوه) را بررسی کرد. آنها تمام مواد خام را قبل از انتقال برای هضم بی‌هوازی

در شرایط دمای متوسط خرد و سپس آسیاب کردند؛ و گزارش کردند که پسماند کشاورزی و صنعتی مبتنی بر میوه نسبت بیشتری از بیوگاز را در مقایسه با باقی مانده‌های محصولات کشاورزی تولید می‌کنند. برای پسماند کشاورزی-صنعتی مبتنی بر میوه، بازده بیوگاز به مدت ۱۵ روز قبل از ورود به فاز ثابت به طور متوسط افزایش یافت؛ اما برای باقی مانده‌های محصولات کشاورزی، عملکرد نسبتاً آهسته بود. هر دو نوع پسماند انتخاب شده دارای نسبت بالاتری از لیگنین هستند. این امر به طور مثبت بر مقادیر متان در بیوگاز تأثیر می‌گذارد. ژنگ و همکاران (2013) همچنین گزارش کردند که پوست سیب، پرتقال و موز قابلیت تولید بیوگاز در شرایط دمای متوسط توسط هضم بی هوازی را دارد. احمد و همکاران (2018) پیشنهاد کردند که خواص فیزیکوشیمیایی مواد می‌تواند بر متابولیسم و عملکرد میکروب‌ها در فرآیند هضم بی هوازی و همچنین، بر تولید بیوگاز تأثیر بگذارد.

۴-۵ نتیجه گیری

پسماند غذایی از سبزیجات، میوه‌ها، محصولات لبنی، نشاسته، قندها، پسماند آبجوسازی، گوشت و آرد غلات تشکیل شده است. آنها منابع غنی از پروتئین، کربوهیدرات (سلولز، همی سلولز و نشاسته)، چربی، اسیدهای آلی و لیگنین هستند. دفع پسماند مواد غذایی یک چالش بزرگ در عصر حاضر است. این پسماند به چندین روش مدیریت می‌شوند. ممکن است در زباله سوز به خاکستر تبدیل شوند، کمپوست شوند، در فضای باز در آتش سوزانده شوند؛ یا در محل‌های دفن زباله ریخته شوند. دفع پسماند مواد غذایی در محل‌های دفن زباله عملی مناسب نیست؛ زیرا منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود. محققان دریافته‌اند که پسماند مواد غذایی را می‌توان مستقیماً به محصولات مفید مانند سوخت‌های زیستی تبدیل کرد. سوخت‌های زیستی منابع انرژی سازگار با محیط زیست هستند؛ زیرا از زیست توده آلی توسط فعالیت میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شوند. میوه‌ها و پسماند سبزیجات می‌توانند توسط میکروارگانیسم‌ها تخمیر شوند. این پسماند تخمیر شده، انواع مختلفی از سوخت‌های زیستی مانند بیواتانول، هیدروژن زیستی، بیوگاز و بیودیزل را تولید کنند. این سوخت‌های زیستی تولید شده می‌توانند به عنوان منابع انرژی استفاده شوند؛ و در حمل و نقل، پخت و پز و علاوه بر این، به عنوان منابع انرژی زیستی مورد استفاده قرار گیرند. تحقیقات بیشتر مورد نیاز است؛ زیرا تولید سوخت‌های زیستی از پسماند مواد غذایی هنوز در مرحله مقدماتی است. ممکن است که در آینده، سوخت‌های زیستی بتواند جایگزین سوخت‌های فسیلی معمولی شود.

منابع

- Abdullah SHYS, Hanapi NHM, Azid A, Umar R, Juahir H, Khatoon H, Endut AA (2017) A review of biomass-derived heterogeneous catalyst for a sustainable biodiesel production. *Renew Sust Energy Rev* 70:1040–1051
- Abebe MA (2017) Characterisation peel of fruit and leaf of vegetable waste with cow dung for maximizing the biogas yield. *Int J Energy Power Eng* 6(2):13–21
- Abubackar HN, Keskin T, Arslan K, Vural C, Aksu D, Yavuzylmaz DK, Ozdemir G, Azbar N (2019) Effects of size and autoclavation of fruit and vegetable wastes on biohydrogen production by dark dry anaerobic fermentation under mesophilic condition. *Int J Hydrog Energy* 44: 17767–17780
- Abudi ZN, Hu Z, Sun N, Xiao B, Rajaa N, Liu C, Guo D (2016) Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio. *Energy* 107: 131–140
- Agarwal M, Tardio J, Venkata Mohan S (2013) Biohydrogen production from kitchen based vegetable waste: effect of pyrolysis temperature and time on catalysed and non-catalysed operation. *Bioresour Technol* 130:502–509
- Ahmed AMS, Buezo KA, Saady NMC (2018) Adapting anaerobic consortium to pure and complex lignocellulose substrates at low temperature: kinetics evaluation. *Int J Recycl Org Waste Agric* 8:99–110
- Alshiyab H, Kalil MS, Hamid AA, Yusoff WMW (2008) Trace metal effect on hydrogen production using *C. acetobutylicum*. *J Biol Sci* 8:1–9
- Amekan Y, Wangi D, Nur Cahyanto M, Widada J, Sarto S (2018) Effect of different inoculum combination on biohydrogen production from melon fruit waste. *Int J Renew Energy Dev* 7: 101–109
- Angeriz-Campoy R, Álvarez-Gallego CJ, Romero-García LI (2015) Thermophilic anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) with food waste (FW): enhancement of bio-hydrogen production. *Bioresour Technol* 194:291–296
- Argun H, Kargi F (2009) Effects of sludge pre-treatment method on bio-hydrogen production by dark fermentation of waste ground wheat. *Int J Hydrog Energy* 34:8543–8548
- Argun H, Gokfiliz P, Karapinar I (2017) Biohydrogen production potential of different biomass sources. In: Singh A, Rathore D (eds) *Biohydrogen production: sustainability of current technology and future perspective*. Springer, New Delhi, pp 11–48
- Arumugam A, Thulasidharan D, Jegadeesan GB (2018) Process optimization of biodiesel production from *Hevea brasiliensis* oil using lipase immobilized on spherical silica aerogel. *Renew Energy* 116:755–761
- Azbar N, Cetinkaya Dokgoz T, Keskin T, Korkmaz K, Syed H (2009) Continuous fermentative hydrogen production from cheese whey wastewater under thermophilic anaerobic conditions. *Int J Hydrog Energy* 34:7441–7447
- Bakar MSA, Titiloye JO (2013) Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *J Anal Appl Pyrolysis* 103:362–368
- Balajii M, Niju S (2020) Banana peduncle - a green and renewable heterogeneous base catalyst for biodiesel production from *Ceiba pentandra* oil. *Renew Energy* 146:2255–2269

- Balat M (2010) Thermochemical routes for biomass-based hydrogen production. *Energy Sources Part A* 32:1388–1398
- Bando Y, Fujimoto N, Suzuki M, Ohnishi A (2013) A microbiological study of biohydrogen production from beer lees. *Int J Hydrog Energy* 27:2709–2718
- Bardiya N, Somayaji D, Khanna S (1996) Biomethanation of banana peel and pine-apple waste. *Bioresour Technol* 58:73–76
- Bart JCJ, Palmeri N, Cavallaro S (2010) Biodiesel science and technology from soil to oil. Woodhead publishing series in energy, vol 7, 1st edn. CRC Press, Boca Raton
- Baskar G, Aiswarya R (2016) Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. *Renew Sust Energ Rev* 57:496–504
- Betiku E, Akintunde AM, Ojumu TV (2016) Banana peels as a biobase catalyst for fatty acid methyl esters production using Napoleon's plume (*Bauhinia monandra*) seed oil: a process parameters optimization study. *Energy* 103:797–806
- Bhurat KS, Banerjee T, Pandey JK, Belapurkar P (2020) Fermentative bio-hydrogen production using lignocellulosic waste biomass: a review. *Waste Dispos Sustain Energy* 2:249–264
- Boileau C, Auria R, Davidson S, Casalot L, Christen P, Liebgott P-P, Combet-Blanc Y (2016) Hydrogen production by the hyperthermophilic bacterium *Thermotoga maritima* part I: effects of sulfured nutriment, with thiosulfate as model, on hydrogen production and growth. *Biotechnol Biofuels* 9:269
- Borowski S (2015) Co-digestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge. *J Environ Manag* 147:87–94
- Bull OS, Obunwo CC (2014) Biodiesel production from oil of orange (*Citrus sinensis*) peels as feedstock. *J Appl Sci Environ Manage* 18:371–374
- Canakci M (2007) The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. *Bioresour Technol* 98:183–190
- Canakci M, Gerpan JV (1999) Biodiesel production via acid catalysis. *Trans Am Soc Agric Eng* 42: 1203–1210
- Cano QDY (2015) Estudio de algunos parámetros durante la generación de biohidrógeno a partir de fermentación anaerobia de residuos orgánicos urbanos. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
- Cappelletti M, Bucchi G, De Sousa Mendes J, Alberini A, Fedi S, Bertin L, Frascari D (2012) Biohydrogen production from glucose, molasses and cheese whey by suspended and attached cells of four hyperthermophilic *Thermotoga* strains. *J Chem Technol Biotechnol* 87:1291–1301
- Cárdenas M, León E, Zapata Z, David A (2019) Biohydrogen production by co-digestion of fruits and vegetable waste and coffee mucilage. *Rev Fac Nac Agron Medellín* 72:9007–9018
- Carota E, Crognale S, D'Annibale A, Gallo AM, Stazi SR, Petruccioli M (2017) A sustainable use of ricotta cheese whey for microbial bio-diesel production. *Sci Total Environ* 584–585:554–560
- Carota E, Crognale S, D'Annibale A, Petruccioli M (2018) Bioconversion of agro-industrial waste into microbial oils by filamentous fungi. *Process Saf Environ Protect* 117:143–151

- Carota E, Petruccioli M, D'Annibale A, Gallo AM, Crognale S (2020) Orange peel waste-based liquid medium for biodiesel production by oleaginous yeasts. *Appl Microbiol Biotechnol* 104: 4617–4628
- Carvalho A, Fragoso R, Gominho J, Duarte E (2017) Effect of minimizing d-limonene compound on anaerobic cdigestion feeding mixtures to improve methane yield. *Waste Biomass Valorization* 75–83
- Castelló E, Santos CG, Iglesias T, Paolino G, Wenzel J, Borzacconi L, Etchebehere C (2009) Feasibility of biohydrogen production from cheese whey using a UASB reactor: links between microbial community and microbial performance. *Int J Hydrog Energy* 34:5674–5682
- Chanakya HN, Ramachandra TV, Vijagachamundeeswari M (2006) Anaerobic digestion and reuse of digested products of selected products of urban solid waste
- Chen G, Andries J, Spliethoff H (2003) Catalytic pyrolysis of biomass for hydrogen rich fuel gas production. *Energy Convers Manag* 44:2289–2296
- Cheng J-R, Zhu M-J (2016) Biohydrogen production from pretreated lignocellulose by *Clostridium thermocellum*. *Biotechnol Bioprocess Eng* 21:87–94
- Choudhury S, Bose PK (2008) Jatropha derived biodiesel—its suitability as CI engine fuel. In: SAE India international mobility conference paper no. 2008-28-0040, pp 269–273
- Chu CF, Li YY, Xu KQ, Ebie Y, Inamori Y, Kong HN (2008) A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. *Int J Hydrog Energy* 33:4739–4746
- Chua KH, Yip CH, Nie WLS (2008) A case study on the anaerobic treatment of food waste and gas formation. *Int Conf Constr Build Tech F* 29:311–316
- Chuang YS, Lay CH, Sen B, Chen CC, Gopalakrishnan K, Wu JH, Lin CS, Lin CY (2011) Biohydrogen and biomethane from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) fermentation: effects of substrate concentration and incubation temperature. *Int J Hydrog Energy* 36:14195–14203
- Cieciura-Włoch W, Borowski S (2019) Biohydrogen production from wastes of plant and animal origin via dark fermentation. *J Environ Eng Landsc Manag* 27:101–113
- Cieciura-Włoch W, Borowski S, Otlewska A (2020) Biohydrogen production from fruit and vegetable waste, sugar beet pulp and corn silage via dark fermentation. *Renew Energy* 153: 1226–1237
- Coker AO, Sridhar MKC, Akinyele JO (2008) An assessment of food residuals and development of an on-site composting bin for a community in Ibadan, Nigeria. *Agric Eng Int CIGR e-J*
- Collet C, Adler N, Schwitzguébel JP, Péringer P (2004) Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose. *Int J Hydrog Energy* 29:1479–1485
- Dada O, Yusoff W, Kalil M (2013) Biohydrogen production from rice bran using *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4. *Int J Hydrog Energy* 38:15063–15073
- Danko AS, Pinheiro F, Abreu AA, Alves MM (2008) Effect of methanogenic inhibitors, inocula type, and temperature on biohydrogen production from food components. *Environ Eng Manag J* 7:531–536

- Demirbas A (2006) Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics. *Energy Convers Manag* 47:2271–2282
- Demirbas A (2008) New liquid biofuels from vegetable oils via catalytic pyrolysis. *Energy Educ Sci Technol* 21:1–59
- Dennis OE (2015) Effect of inoculums on biogas yield. *IOSR J Appl Chem* 8:05–08
- Deressa L, Libsu S, Chavan RB, Manaye D, Dabassa A (2015) Production of biogas from fruit and vegetable wastes mixed with different wastes. *Environ Ecol Res* 3:65–71
- Dewan A, Sarmah M, Thakur AJ, Bharali P, Bora U (2018) Greener biogenic approach for the synthesis of palladium nanoparticles using papaya peel: an eco-friendly catalyst for CeC coupling reaction. *ACS Omega* 3:5327–5335
- Di Maria F, Sordi A, Cirulli G, Gigliotti G, Massaccesi L, Cucina M (2014) Cotreatment of fruit and vegetable waste in sludge digesters. An analysis of the relationship among bio-methane generation, process stability and digestate phytotoxicity. *Waste Manag* 34:1603–1608
- Di Maria F, Sordi A, Cirulli G, Micale C (2015) Amount of energy recoverable from an existing sludge digester with the co-digestion with fruit and vegetable waste at reduced retention time. *Appl Energy* 150:9–14
- Doi T, Matsumoto H, Abe J, Morita S (2010) Application of rice rhizosphere microflora for hydrogen production from apple pomace. *Int J Hydrog Energy* 35:7369–7376
- Dong L, Zhenhong Y, Yongming S, Longlong M (2011) Anaerobic fermentative co-production of hydrogen and methane from an organic fraction of municipal solid waste. *Energy Sources A Recov Util Environ Effects* 33:575–585
- dos Santos LA, Valença RB, da Silva LCS, de Barros Holanda SH, da Silva AFB, Juca JFT, Santos AFMS (2020) Methane generation potential through anaerobic digestion of fruit waste. *J Clean Prod* 256:120389
- Dourou M, Mizerakis P, Papanikolaou S, Aggelis G (2017) Storage lipid and polysaccharide metabolism in *Yarrowia lipolytica* and *Umbelopsis isabellina*. *Appl Microbiol Biotechnol* 101:7213–7226
- Dourou M, Aggeli D, Papanikolaou S, Aggelis G (2018) Critical steps in carbon metabolism affecting lipid accumulation and their regulation in oleaginous microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol* 102:2509–2523
- Elbeshbishy E, Hafez H, Nakhla G (2011a) Ultrasonication for biohydrogen production from food waste. *Int J Hydrog Energy* 36:2896–2903
- Elbeshbishy E, Hafez H, Dhar BR, Nakhla G (2011b) Single and combined effect of various pretreatment methods for biohydrogen production from food waste. *Int J Hydrog Energy* 36: 11379–11387
- El-Mashad HM, Zhang R (2010) Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresour Technol* 101:4021–4028
- Elsayed M, Diab A, Soliman M (2020) Methane production from anaerobic co-digestion of sludge with fruit and vegetable wastes: effect of mixing ratio and inoculum type. *Biomass Conv Bioref* 12
- Escamilla-Alvarado C, Ríos-Leal E, Ponce-Noyola MT, Poggi-Varaldo HM (2012) Gas biofuels from solid substrate hydrogenogenic-methanogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Process Biochem* 47:1572–1587

- Esparza I, Jiménez-Moreno N, Bimbela F, Ancín-Azpilicueta C, Gandía LM (2020) Fruit and vegetable waste management: conventional and emerging approaches. *J Environ Manag* 265: 110510
- Espina L, Somolinos M, Lorán S, Conchello P, García D, Pagán R (2011) Chemical composition of commercial citrus fruit essential oils and evaluation of their antimicrobial activity acting alone or in combined processes. *Food Control* 22:896–902
- Ferchichi M, Crabbe E, Gil GH, Hintz W, Almadidy A (2005) Influence of initial pH on hydrogen production from cheese whey. *J Biotechnol* 120:402–409
- Forster-Carneiro T, Pérez M, Romero LI, Sales D (2007) Dry thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: focusing on the inoculum sources. *Bioresour Technol* 98:3195–3203
- Galanakis CM (2012) Recovery of high added-value components from food wastes: conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends Food Sci Technol* 26:68–87
- Ghadge SV, Raheman H (2005) Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids. *Biomass Bioenergy* 28:601–605
- Gohain M, Devi A, Deka D (2017) Musa balbisiana Colla peel as highly effective renewable heterogeneous base catalyst for biodiesel production. *Ind Crop Prod* 109:8–18
- Gohain M, Laskar K, Paul AK, Daimary N, Maharana M, Goswami IK, Hazarika A, Bora U, Deka D (2020) Carica papaya stem: a source of versatile heterogeneous catalyst for biodiesel production and Ce-C bond formation. *Renew Energy* 147:541–555
- Gómez X, Cuetos MJ, Cara J, Morán A, García AI (2006) Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renew Energy* 31:2017–2024
- Gomez-Romero J, Gonzalez-Garcia A, Chairez L, Torres I, García-Peña EI (2014) Selective adaptation of an anaerobic microbial community: biohydrogen production by co-digestion of cheese whey and vegetables fruit waste. *Int J Hydrog Energy* 39:12541–12550
- Grause G, Igarashi M, Kameda T, Yoshioka T (2012) Lactic acid as a substrate for fermentative hydrogen production. *Int J Hydrog Energy* 37:16967–16973
- Günerhan Ü, Us E, Dumlu L, Yılmaz V, Carrère H, Perendeci AN (2020) Impacts of chemicalassisted thermal pretreatments on methane production from fruit and vegetable harvesting wastes: process optimization. *Molecules* 25:500
- Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, Van Otterdijk R, Meybeck A (2011) Global food losses and food waste: extent, causes and prevention. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
- Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, Emanuelsson A (2013) The methodology of the FOA study: global food losses and food waste-extent, causes and prevention. The Swedish Institute for Food and Biotechnology, Gothenburg
- Habiba L, Hassib B, Moktar H (2009) Improvement of activated sludge stabilisation and filterability during anaerobic digestion by fruit and vegetable waste addition. *Bioresour Technol* 100:1555–1560
- He M, Sun Y, Zou D, Yuan H, Zhu B, Li X, Pang Y (2012) Influence of temperature on hydrolysis acidification of food waste. In: Seventh international conference on waste management and technology (ICWMT 7), vol 16, pp 85–94

- Heb F (2009) Decentralised anaerobic digestion of market waste – a case study in Thiruvananthapuram, India. *Sandec report*
- Heo NH, Park SC, Lee JS, Kang H, Park DH (2003) Single-stage anaerobic codigestion for mixture wastes of simulated Korean food waste and waste activated sludge. In: *Biotechnology for fuels and chemicals*. Humana Press, Totowa, pp 567–579
- Hernández MA, Rodríguez SM, Yves A (2014) Use of coffee mucilage as a new substrate for hydrogen production in anaerobic co-digestion with swine manure. *Bioresour Technol* 168: 112–118
- Hidalgo D, Martín-Marroquín JM (2014) Effects of inoculum source and co-digestion strategies on anaerobic digestion of residues generated in the treatment of waste vegetable oils. *J Environ Manag* 142:17–22
- Huang X, Yun S, Zhu J, Du T, Zhang C, Li X (2016) Mesophilic anaerobic codigestion of aloe peel waste with dairy manure in the batch digester: focusing on mixing ratios and digestate stability. *Bioresour Technol* 218:62–68
- Ismail F, Nor'Aini AR, Abd-Aziz S, Chong ML, Hassan MA (2009) Statistical optimization of biohydrogen production using food waste under thermophilic conditions. *Open Renew Energ J* 2:124–131
- Jo JH, Jeon CO, Lee DS, Park JM (2007) Process stability and microbial community structure in anaerobic hydrogen-producing microflora from food waste containing kimchi. *J Biotechnol* 131:300–308
- Jugal Sukhesh M, Venkateswara Rao P (2019) Synergistic effect in anaerobic co-digestion of rice straw and dairy manure—a batch kinetic study. *Energy Sources A* 41:2145–2156
- Kanchanasutaa S, Haosagul S, Pisutpaisal N (2016) Metabolic flux analysis of hydrogen production from rice starch by anaerobic sludge under varying organic loading. *Chem Eng* 49:409
- Karamerou EE, Webb C (2019) Cultivation modes for microbial oil production using oleaginous yeasts—a review. *Biochem Eng J* 151:107322
- Kargi F, Eren NS, Ozmichi S (2012) Hydrogen production from cheese whey powder (CWP) solution by thermophilic dark fermentation. *Int J Hydrog Energy* 37:2260–2262
- Karmee SK (2016) Liquid biofuels from food waste: current trends, prospect and limitation. *Renew Sust Energ Rev* 53:945–953
- Karmee SK (2017) Technical valorisation of spent coffee grounds and food waste using sulphuric acid immobilised on silica. *Biofuels* 11:155
- Keskin T, Arslan K, Abubackar HN, Vural C, Eroglu D, Karaalp D, Yanik J, Ozdemir G, Azbar N (2018) Determining the effect of trace elements on biohydrogen production from fruit and vegetable wastes. *Int J Hydrog Energy* 43:10666–10677
- Khan S, Afzal M, Iqbal S, Mirza MS, Khan QM (2013) Inoculum pretreatment affects bacterial survival, activity and catabolic gene expression during phytoremediation of diesel contaminated soil. *Chemosphere* 91:663–668
- Khan MA, Ngo HH, Guo W, Liu Y, Zhang X, Guo J, Chang SW, Nguyen DD, Wang J (2018) Biohydrogen production from anaerobic digestion and its potential as renewable energy. *Renew Energy* 129(Part B):754–768
- Kim MS, Lee DY (2010) Fermentative hydrogen production from tofu-processing waste and anaerobic digester sludge using microbial consortium. *Bioresour Technol* 101:548–552

- Kim SH, Han SK, Shin HS (2004) Feasibility of biohydrogen production by anaerobic codigestion of food waste and sewage sludge. *Int J Hydrog Energy* 29:1607–1616
- Kim DH, Kim SH, Ko IB, Lee CY, Shin HS (2008) Start-up strategy for continuous fermentative hydrogen production: early switchover from batch to continuous operation. *Int J Hydrog Energy* 33:1532–1541
- Kim DH, Kim SH, Shin HS (2009) Hydrogen fermentation of food waste without inoculums addition. *Enzym Microb Technol* 45:181–187
- Kim MS, Lee DY, Kim DH (2011a) Continuous hydrogen production from tofu processing waste using anaerobic mixed microflora under thermophilic conditions. *Int J Hydrog Energy* 36:8712–8718
- Kim DH, Kim SH, Kim HW, Kim MS, Shin HS (2011b) Sewage sludge addition to food waste synergistically enhances hydrogen fermentation performance. *Bioresour Technol* 102:8501–8506
- Kim DH, Lee DY, Kim MS (2011c) Enhanced biohydrogen production from tofu residue by acid/ base pretreatment and sewage sludge addition. *Int J Hydrog Energy* 36:13922–13927
- Kim DH, Kim SH, Jung KW, Kim MS, Shin HS (2011d) Effect of initial pH independent of operational pH on hydrogen fermentation of food waste. *Bioresour Technol* 102:8646–8652
- Kim DH, Wu J, Jeong KW, Kim MS, Shin HS (2011e) Natural inducement of hydrogen from food waste by temperature control. *Int J Hydrog Energy* 36:10666–10673
- Kim J, Kim J, Lee C (2019) Anaerobic co-digestion of food waste, human feces, and toilet paper: methane potential and synergistic effect. *Fuel* 248:189–195
- Koch K, Plabst M, Schmidt A, Helmreich B, Drewes JE (2016) Codigestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: comparison of batch tests and full-scale experiences. *Waste Manag* 47:28–33
- Kokila T, Ramesh PS, Geetha D (2016) Biosynthesis of AgNPs using Carica papaya peel extract and evaluation of its antioxidant and antimicrobial activities. *Ecotoxicol Environ Saf* 134:467–473
- Konwar LJ, Das R, Thakur AJ, Salminen E, Maki-Arvela P, Kumar N, Mikkola JP, Deka D (2014) Biodiesel production from acid oils using sulfonated carbon catalyst derived from oil-cake waste. *J Mol Catal A Chem* 388:167–176
- Korai MS, Mahar RB, Uqaili MA (2018) The seasonal evolution of fruit, vegetable and yard wastes by mono, co and tri-digestion at Hyderabad, Sindh Pakistan. *Waste Manage* 71:461–473
- Kosseva MR (2009) Chapter 3 processing of food wastes. *Adv Food Nutr Res* 58:57–136
- Kothari R, Singh DP, Tyagi VV, Tyagi SK (2012) Fermentative hydrogen production – an alternative clean energy source. *Renew Sust Energy Rev* 16:2337–2346
- Kumar D, Singh B, Banerjee A, Chatterjee S (2018) Cement wastes as trans-esterification catalysts for the production of biodiesel from Karanja oil. *J Clean Prod* 183:26–34
- Kusdiana D, Saka S (2004) Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresour Technol* 91:289–295
- Lakhal R, Auria R, Davidson S, Ollivier B, Durand M-C, Dolla A, Hamdi M, Combet-Blanc Y (2011) Oxygen uptake rates in the hyperthermophilic anaerobe *Thermotoga maritima*

- grown in a bioreactor under controlled oxygen exposure: clues to its defence strategy against oxidative stress. *Arch Microbiol* 193:429–438
- Larichev YV (2008) Valence state study of supported ruthenium Ru/MgO catalysts. *J Phys Chem C* 112:14776–14780
- Lee YW, Chung J (2010) Bioproduction of hydrogen from food waste by pilot-scale combined hydrogen/methane fermentation. *Int J Hydrog Energy* 35:11746–11755
- Lee E, Bittencourt P, Casimir L, Jimenez E, Wang M, Zhang Q, Ergas SJ (2019) Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge. *Waste Manag* 95:432–439
- Leiva-Candia DE, Pinzi S, Redel-Macías MD, Koutinas A, Webb C, Dorado MP (2014) The potential for agro-industrial waste utilization using oleaginous yeast for the production of biodiesel. *Fuel* 123:33–42
- Leung DY, Guo Y (2006) Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production. *Fuel Process Technol* 87:883–890
- Li L, Yang X, Li X, Zheng M, Chen J, Zhang Z (2011) The influence of inoculum sources on anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stover. *Energy Sources A Recov Util Environ Effects* 33:138–144
- Li P, Liu Z, Zhao M, Dai X, Ruan W (2020) Evaluation of biogas performance and process stability from food, kitchen, and fruit/vegetable waste by mono-, co-, and tridigestion. *Energy Fuel* 34: 12734–12742
- Lim TK (2012) Edible medicinal and non-medicinal plants. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lin CY, Cheng CH (2006) Fermentative hydrogen production from xylose using anaerobic mixed microflora. *Int J Hydrog Energy* 31:832–840
- Lin J, Zuo J, Gan L, Li P, Liu F, Wang K, Gan H (2011) Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. *J Environ Sci* 23:1403–1408
- Lin CSK, Pfaltzgraff LA, Herrero-Davila L, Mubofu EB, Abderrahim S, Clark JH, Koutinas AA, Kopsahelis N, Stamatelatos K, Dickson F, Thankappan S, Mohamed Z, Brocklesby R, Luque R (2013) Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energy Environ Sci* 6:426–464
- Liu G, Zhang R, El-Mashad HM, Dong R (2009) Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresour Technol* 100:5103–5108
- Lotero E, Liu Y, Lopez DE, Suwannakarn K, Bruce DA, Goodwin JG (2005) Synthesis of biodiesel via acid catalysis. *Ind Eng Chem Res* 44:5353–5363
- Łukajtis R, Hołowacz I, Kucharska K, Glinka M, Rybarczyk P, Przyjazny A, Kamiński M (2018) Hydrogen production from biomass using dark fermentation. *Renew Sust Energ Rev* 91:665–694
- Mahato RK, Kumar D, Rajagopalan G (2020) Biohydrogen production from fruit waste by *Clostridium* strain BOH3. *Renew Energy* 153:1368–1377
- Mandavgane S, Pathak P, Kulkarni B (2017) Fruit peel waste: characterization and its potential uses. *Curr Sci* 113:444–454

- Maranon E, Castrillon L, Quiroga G, Fernandez-Nava Y, Gomez L, Garcia MM (2012) Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste Manag* 32:1821–1825
- Martín MA, Siles JA, Chica AF, Martín A (2010) Biomethanization of orange peel waste. *Bioresour Technol* 101:8993–8999
- Meher LC, Dharmagadda VSS, Naik SN (2006a) Optimization of alkali-catalyzed transesterification of *Pongamia pinnata* oil for production of biodiesel. *Bioresour Technol* 97: 1392–1397
- Meher LC, Sagar DV, Naik SN (2006b) Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. *J Renew Sustain Energy* 10:248–268
- Mendonça IM, Paes OARL, Maia PJS, Souza MP, Almeida RA, Silva CC, Duvoisin S, de Freitas FA (2019) New heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste tucuma peels (*Astrocaryum aculeatum* Meyer): parameters optimization study. *Renew Energy* 130:103–110
- Mohan V, Srikanth S (2012) Regulatory function of divalent cations in controlling the acidogenic biohydrogen production process. *RSC Adv* 2:6576–6589
- Mohan SV, Mohanakrishna G, Goud RK, Sarma PN (2009) Acidogenic fermentation of vegetable based market waste to harness biohydrogen with simultaneous stabilization. *Bioresour Technol* 100:3061–3068
- Mohanakrishna G, Kannaiah Goud R, Mohan VS, Sarma PN (2010) Enhancing biohydrogen production through sewage supplementation of composite vegetable based market waste. *Int J Hydrog Energy* 35:533–541
- Mozhiarasi V, Weichgrebe D, Srinivasan SV (2020) Enhancement of methane production from vegetable, fruit and flower market wastes using extrusion as pretreatment and kinetic modeling.
- Water Air Soil Pollut 231:126
- Mthethwa NP, Nasr M, Bux F, Kumari S (2018) Utilization of *Pistia stratiotes* (aquatic weed) for fermentative biohydrogen: electron-equivalent balance, stoichiometry, and cost estimation. *Int J Hydrog Energy* 43:8243–8255
- Mthethwa NP, Nasr M, Kiambi SL, Bux F, Kumari S (2019) Biohydrogen fermentation from *Pistia stratiotes* (aquatic weed) using mixed and pure bacterial cultures. *Int J Hydrog Energy* 44: 17720–17731
- Mu L, Zhang L, Zhu KY, Ma J, Ifran M, Li AM (2020) Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: synergistic enhancement on process stability and biogas production. *Sci Total Environ* 704:135429
- Murugesan AC, Umarani TR, Chinnusamy M, Krishnan R, Subramanian R, Neduzchezhain N (2009) Production and analysis of biodiesel from non-edible oils—a review. *Renew Sustain Energy Rev* 13:825–834
- Nakajima K, Hara M (2012) Amorphous carbon with SO₃H groups as a solid Brønsted acid catalyst. *ACS Catal* 2:1296–1304
- Nand K (1994) *Indian Food Industry* 3:23–24
- Nansubuga I, Banadda N, Babu M, De Vrieze J, Verstraete W, Rabaey K (2015) Enhancement of biogas potential of primary sludge by co-digestion with cow manure and brewery sludge. *Int J Agric Biol Eng* 8:86–94

- Obi C, Bezim-Ezeani MU, Nwagbo EJ (2020) Production of biodiesel using novel *C. lepodita* oil in the presence of heterogeneous solid catalyst. *Chem Int* 6:91–97
- Ogbu JU, Umeokechukwu CE (2014) Aspects of fruit biology of three wild edible monkey kola species fruits (*Cola* spp: Malvaceae). *Ann Res Rev Biol* 4:2007–2014
- OjikutuAbimbola O, Osokoya Olumide O (2014) Evaluation of biogas production from food waste. *Int J Eng Sci* 3:01–07
- Okamoto M, Miyahara T, Mizuno O, Noike T (2000) Biological hydrogen potential of materials characteristic of the organic fraction of municipal solid wastes. *Water Sci Technol* 41:25–32
- Osman AI, Abu-Dahrieh JK, Rooney DW, Thompson J, Halawy SA, Mohamed MA (2017) Surface hydrophobicity and acidity effect on alumina catalyst in catalytic methanol dehydration reaction. *J Chem Technol Biotechnol* 92:2952–2962
- Pan Y, Zhi Z, Zhen G, Lu X, Bakonyi P, Li Y-Y, Zhao Y, Rajesh Banu J (2019) Synergistic effect and biodegradation kinetics of sewage sludge and food waste mesophilic anaerobic co-digestion and the underlying stimulation mechanisms. *Fuel* 253:40–49
- Panwar NL, Shrirame HY (2009) The emission characteristics of a compression ignition engine operating on castor oil methyl ester. *Int J Global Warm* 1:368–377
- Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S (2011) Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renew Sust Energ Rev* 15:1513–1524
- Papanikolaou S, Kampisopoulou E, Blanchard F, Rondags E, Gardeli C, Koutinas AA, Chevalot I, Aggelis G (2017) Production of secondary metabolites through glycerol fermentation under carbon-excess conditions by the yeasts *Yarrowia lipolytica* and *Rhodospiridium toruloides*. *Eur J Lipid Sci Technol* 119:1600507
- Papargyropoulou E, Lozano R, Steinberger JK, Wright N, Ujang ZB (2014) The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste. *J Clean Prod* 76:106–115
- Parawira W, Murto M, Read JS, Mattiasson B (2005) Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste. *Process Biochem* 40: 2945–2952
- Park WK, Moon M, Kwak MS, Jeon S, Choi GG, Yang JW, Lee B (2014) Use of orange peel extract for mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris*: increased production of biomass and FAMES. *Bioresour Technol* 171:343–349
- Pathak G, Das D, Rajkumari K, Rokhum L (2018) Exploiting waste: towards a sustainable production of biodiesel using: *Musa acuminata* peel ash as a heterogeneous catalyst. *Green Chem* 20:2365–2373
- Patil P, Deng S, Rhodes JI, Lammers PJ (2010) Conversion of waste cooking oil to biodiesel using ferric sulfate and supercritical methanol processes. *Fuel* 89:360–364
- Pavi S, Kramer LE, Gomes LP, Miranda LAS (2017) Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresour Technol* 228: 362–367
- Pazmino-Hernandez M, Moreira CM, Pullammanappallil P (2017) Feasibility assessment of waste banana peduncle as feedstock for biofuel production. *Biofuels* 7269:1–12

- Perna V, Castello E, Wenzel J, Zampol C, Fontes Lima DM, Borzacconi L (2012) Hydrogen production in an upflow anaerobic packed bed reactor used to treat cheese whey. *Int J Hydrog Energy* 36:54–62
- Pinto AC, Guarieiro LLN, Rezende MJC, Ribeiro NM, Torres EA, Lopes WA, Pereira PADP, de Andrade JB (2005) Biodiesel: an overview. *J Brazil Chem Soc* 16:1313–1330
- Pleissner D, Kwan TH, Lin CSK (2014) Fungal hydrolysis in submerged fermentation for food waste treatment and fermentation feedstock preparation. *Bioresour Technol* 158:48–54
- Prabakar D, Manimudi VT, Suvetha SK, Sampath S, Mahapatra DM, Rajendran K, Pugazhendhi A (2019) Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: outlook and prospects. *Renew Sustain Energy Rev* 96:306–324
- Prabhudessai V, Ganguly A, Mutnuri S (2013) Biochemical methane potential of agro wastes. *J Energy* 2013:350731
- Pradhan N, Dipasquale L, d'Ippolito G, Panico A, Lens P, Esposito G, Fontana A (2015) Hydrogen production by the thermophilic bacterium *Thermotoga neapolitana*. *Int J Mol Sci* 16:12578–12600
- Prazeres AR, Carvalho F, Rivas J (2012) Cheese whey management: a review. *J Environ Manag* 110:48–68
- Qinglan H, Chang W, Dingqiang L, Yao W, Dan L, Guiju L (2010) Production of hydrogen rich gas from plant biomass by catalytic pyrolysis at low temperature. *Int J Hydrog Energy* 35:8884–8890
- Radjaram B, Saravanane R (2011) Assessment of optimum dilution ratio for biohydrogen production by anaerobic co-digestion of press mud with sewage and water. *Bioresour Technol* 102: 2773–2780
- Rahmat BR, Hartoyo T, Sunarya Y (2014) Biogas production from tofu liquid waste on treated agricultural waste. *Am J Agric Biol Sci* 9:226–231
- Ravindran R, Jaiswal AK (2016) Exploitation of food industry waste for high-value products. *Trends Biotechnol* 34:58–69
- Rittmann BE, Krajmalnik-Brown R, Halden RU (2008) Pre-genomic, genomic and post-genomic study of microbial communities involved in bioenergy. *Nat Rev Microbiol* 6:604–612
- Ruiz B, Flotats X (2016) Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste. *Biochem Eng J* 109:9–18
- Saad MFM, Rahman NÁA, Yusoff MZM (2019) Hydrogen and methane production from co-digestion of food waste and chicken manure. *Pol J Environ Stud* 28:2805–2814
- Sagar NA, Pareek S, Sharma S, Yahia EM, Lobo MG (2018) Fruit and vegetable waste: bioactive compounds, their extraction, and possible utilization. *Compr Rev Food Sci Saf* 17:512–531
- Sahoo PK, Das LM, Babu MKG, Naik SN (2007) Biodiesel development from high acid value polanga seed oil and performance evaluation in a CI engine. *Fuel* 86:448–454
- Saidi R, Liebgott PP, Gannoun H, Gaida LB, Miladi B, Hamdi M, Bouallagui H, Auria R (2018) Biohydrogen production from hyperthermophilic anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes in seawater: simplification of the culture medium of *Thermotoga maritima*. *Waste Manag* 71:474–484

- Santi G, Jasiulewicz J, Crognale S, D'Annibale A, Petruccioli M, Moresi M (2015) High solid loading in dilute acid hydrolysis of orange peel waste improves ethanol production. *Bioenergy Res* 8:1292–1302
- Saratale GD, Saratale RJ, Banu R, Chang J-S (2019) Biohydrogen production from renewable biomass resources. In: *Biohydrogen, biomass, biofuels, biochemicals*, 2nd edn. Elsevier, pp 247–277
- Sarno M, Ponticorvo E (2020) A new nanohybrid for electrocatalytic biodiesel production from waste Amalfi coast lemon seed oil. *Fuel* 267:117178
- Scano EA, Asquer C, Pistis A, Ortu L, Demontis V, Cocco D (2014) Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Convers Manag* 77:22–30
- Schnepf K (2007) Project converts biomass and food processing waste into useable energy. [http:// www.plantservices.com/articles/2007/003.html](http://www.plantservices.com/articles/2007/003.html). Accessed Sept 2012
- Sethupathy A, Arun C, Ravi Teja G, Sivashanmugam P (2019) Enhancing hydrogen production through anaerobic co-digestion of fruit waste with biosolids. *J Environ Sci Health A* 54:563–569
- Shankar V, Jambulingam R (2017) Waste crab shell derived CaO impregnated Na-ZSM-5 as a solid base catalyst for the transesterification of neem oil into biodiesel. *Sustain Environ Res* 27:273–278
- Sharma YC, Singh B (2008) Development of biodiesel from karanja, a tree found in rural India. *Fuel* 67:1740–1422
- Shrirame HY, Panwar NL, Bamniya BR (2011) Biodiesel from castor oil – a green energy option. *Low Carbon Econ* 2:1–6
- Sindhu R, Binod P, Pandey A (2016) Biological pretreatment of lignocellulosic biomass: an overview. *Bioresour Technol* 199:76–82
- Singh V, Haque S, Niwas R, Srivastava A, Pasupuleti M, Tripathi CKM (2017) Strategies for fermentation medium optimization: an in-depth review. *Front Microbiol* 7:2080–2087
- Sirisomboonchai S, Abuduwayiti M, Guan G, Samart C, Abliz S, Hao X, Kusakabe K, Abudula A (2015) Biodiesel production from waste cooking oil using calcined scallop shell as catalyst. *Energy Convers Manag* 95:242
- Sivagurunathan P, Lin C-Y (2019) Biohydrogen production from beverage wastewater using selectively enriched mixed culture. *Waste Biomass Valorization* 11:1049–1058
- Soeprijanto S, Prajitno DH, Setiawan B, Maghfiro W, Rohmawati R (2021) Biogas production from co-digestion of water hyacinth, banana peel and water spinach wastes using a horizontal anaerobic digester. *IOP Conf Series Earth Environ Sci* 649:012022
- Song Z, Yang G, Liu X, Yan Z, Yuan Y, Liao Y (2014) Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. *PLoS One* 9: e93801
- Song X, Shi Z, Li X, Wang X, Ren Y (2019) Fate of proteins of waste activated sludge during thermal alkali pretreatment in terms of sludge protein recovery. *Front Environ Sci Eng* 13:25
- Sreela C, Imai T, Plangklang P, Reungsang A (2011) Optimization of key factors affecting hydrogen production from food waste by anaerobic mixed culture. *Int J Hydrog Energy* 36: 14120–14133

- Sreela-or C, Plangklang P, Imai T, Reungsang A (2011) Co-digestion of food waste and sludge for hydrogen production by anaerobic mixed cultures: statistical key factors optimization. *Int J Hydrog Energy* 36:14227–14237
- Srivastava PK, Verma M (2008) Methyl ester of karanja oil as an alternative renewable source energy. *Fuel* 87:1673–1637
- Suhartini S, Hidayat N, Nurika I (2020) Evaluation of biogas potential from empty fruit oil palm bunches. *IOP Conf Series Earth Environ Sci* 443:1–9
- Taghizadeh AA, Hosseini SH, Ghobadian B, Motevali A (2017) Biofuel production from citrus wastes: a feasibility study in Iran. *Renew. Sust. Energy Rev.* 69:1100–1112
- Tang B, He M, Dong Y, Liu J, Zhao X, Wang C, Wu K, Yin F, Zhang W(2020) Effects of different forms of vegetable waste on biogas and methane production performances in a batch anaerobic digestion reactor. *Energy Sources A Recov Util Environ Effect*
- Tawfik A, El-Qelish M (2014) Key factors affecting on bio-hydrogen production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and kitchen wastewater. *Bioresour Technol* 168: 106–111
- Tchakouteu SS, Chatzifragkou A, Kalantzi O, Koutinas AA, Aggelis G, Papanikolaou S (2015) Oleaginous yeast *Cryptococcus curvatus* exhibits interplay between biosynthesis of intracellular sugars and lipids. *Eur J Lipid Sci Technol* 117:657–672
- Tenca A, Schievano A, Perazzolo F, Adani F, Oberti R (2011) Biohydrogen from thermophilic co-fermentation of swine manure with fruit and vegetable waste: maximizing stable production without pH control. *Bioresour Technol* 102:8582–8588
- Teo SH, Islam A, Yusaf T, Taufiq-Yap YH (2014) Transesterification of *Nannochloropsis oculata* microalga's oil to biodiesel using calcium methoxide catalyst. *Energy* 78:63–71
- Tiwari AK, Kumar A, Raheman H (2007) Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process. *Biomass Bioenergy* 31:569–575
- Trane R, Dahl S, Skjøth-Rasmussen M, Jensen A (2012) Catalytic steam reforming of bio-oil. *Int J Hydrog Energy* 37:6447–6472
- Tsakona S, Papadaki A, Kopsahelis N, Kachrimanidou V, Papanikolaou S, Koutinas A (2019) Development of a circular oriented bioprocess for microbial oil production using diversified mixed confectionery side-streams. *Foods* 8:300
- Tuck, C.O., Perez, E., Horvath, I.T., Sheldon, R.A., Poliakov, M., 2012. Valorization of
- Turhal S, Turanbaev M, Argun H (2019) Hydrogen production from melon and watermelon mixture by dark fermentation. *Int J Hydrog Energy* 44:18811–18817
- Valdez-Vazquez I, Poggi-Varaldo HM (2009) Hydrogen production by fermentative consortia. *Renew Sustain Energy Rev* 13:1000–1013
- Valdez-Vazquez I, Ponce-Noyola MT, Poggi-Varaldo HM (2009) Nutrients related to spore germination improve H₂ production from heat-shock-treated inocula. *Int J Hydrog Energy* 34: 4291–4295
- Van-Ginkel SW, Oh SE, Logan BE (2005) Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewaters. *Int J Hydrog Energy* 30:1535–1542
- Veljkovic VB, Lakicevic SH, Stamenkovic OS, Todorovic ZB, Lazic ML (2006) Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seed oil with a high content of free fatty acids. *Fuel* 85:2671–2675

- Venetsaneas N, Antonopoulou G, Stamatelatou K, Kornaros M, Lyberatos G (2009) Using cheese whey for hydrogen and methane generation in a two-stage continuous process with alternative pH controlling approaches. *Bioresour Technol* 100:3713–3717
- Vijayaraghavan K, Desa A (2006) Biohydrogen generation from palm oil mill effluent using anaerobic contact filter. *Int J Hydrog Energy* 31:1284–1291
- Vijayaraghavan K, Ahmad D, Ibrahim MK (2006) Biohydrogen generation from jackfruit peel using anaerobic contact filter. *Int J Hydrog Energy* 31:569–579
- de Vrije T, Budde MAW, Lips SJ, Bakker RR, Mars AE, Claassen PAM (2010) Hydrogen production from carrot pulp by the extreme thermophiles *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* and *Thermotoga neapolitana*. *Int J Hydrog Energy* 35:13206–13213
- Wagner RC, Regan JM, Oh SE, Zuo Y, Logan BE (2009) Hydrogen and methane production from swine wastewater using microbial electrolysis cells. *Water Resour* 43:1480–1488
- Wang YZ, Shemmeri T, Eames P, McMullan J, Hewitt N, Huang Y (2006) An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emission of a diesel using blends of a vegetable oil. *Appl Thermochem Eng* 26:1684–1691
- Wang W, Xie L, Chen J, Luo G, Zhou Q (2011) Biohydrogen and methane production by co-digestion of cassava stillage and excess sludge under thermophilic condition. *Bioresour Technol* 102:3833–3839
- Wang B, Li S, Tian S, Feng R, Meng Y (2013a) A new solid base catalyst for the transesterification of rapeseed oil to biodiesel with methanol. *Fuel* 104:698–703
- Wang W, Xie L, Luo G, Zhou Q (2013b) Enhanced fermentative hydrogen production from cassava stillage by co-digestion: the effects of different co-substrates. *Int J Hydrog Energy* 38:6980–6988
- Wang XJ, Yang GH, Li F, Feng YZ, Ren GX, Han XH (2013c) Evaluation of two statistical methods for optimizing the feeding composition in anaerobic co-digestion: mixture design and central composite design. *Bioresour Technol* 131:172–178
- Wu X, Yao W, Zhu J (2010) Effect of pH on continuous biohydrogen production from liquid swine manure with glucose supplement using an anaerobic sequencing batch reactor. *Int J Hydrog Energy* 35:6592–6599
- Yang HJ, Shen JQ (2006) Effect of ferrous iron concentration on anaerobic bio-hydrogen production from soluble starch. *Int J Hydrog Energy* 31:2137–2146
- Yasin HMN, Nor'aini AR, Hasfalina CM, Yusoff MZM, Hassan MA (2011) Microbial characterization of hydrogen-producing bacteria in fermented food waste at different pH values. *Int J Hydrog Energy* 36:9571–9580
- Yasin NHM, Mumtaz T, Hassan MA, Rahman NAA (2013) Food waste and food processing waste for biohydrogen production: a review. *J Environ Manag* 130:375–385
- Zagrodnik R, Laniecki M (2015) The role of pH control on biohydrogen production by single stage hybrid dark- and photo-fermentation. *Bioresour Technol* 194:187–195
- Zahan Z, Georgiou S, Muster TH, Othman MZ (2018) Semi-continuous anaerobic co-digestion of chicken litter with agricultural and food wastes: a case study on the effect of carbon/nitrogen ratio, substrates mixing ratio and organic loading. *Bioresour Technol* 270:245–254

- Zhang R, El-Mashad HM, Hartman K, Wang F, Liu G, Choate C, Gamble P (2007) Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresour Technol* 98:929–939
- Zhang AYZ, Sun Z, Leung CCJ, Han W, Lau KY, Li MJ, Lin CSK (2013a) Valorisation of bakery waste for succinic acid production. *Green Chem* 15:690–695
- Zhang C, Xiao G, Peng L, Su H, Tan T (2013b) The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresour Technol* 129:170–176
- Zhao C, Yan H, Liu Y, Huang Y, Zhang R, Chen C, Liu G (2016) Bio-energy conversion performance, biodegradability, and kinetic analysis of different fruit residues during discontinuous anaerobic digestion. *Waste Manag* 52:295–301
- Zheng W, Phoungthong K, Lü F, Shao LM, He P (2013) Evaluation of a classification method for biodegradable solid wastes using anaerobic degradation parameters. *Waste Manag* 33:2632–2640
- Zhu H, Parker W, Basnar R, Proracki A, Faletta P, Béland M, Seto P (2008) Biohydrogen production by anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge. *Int J Hydrog Energy* 33:3651–3659
- Zhu H, Parker W, Basnar R, Proracki A, Falletta P, Béland M, Seto P (2009a) Buffer requirements for enhanced hydrogen production in acidogenic digestion of food wastes. *Bioresour Technol* 100:5097–5102
- Zhu J, Li Y, Wu X, Miller C, Chen P, Ruan R (2009b) Swine manure fermentation for hydrogen production. *Bioresour Technol* 100:5472–5477
- Zhu J, Wan C, Li Y (2010) Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. *Bioresour Technol* 101:7523–7528
- Zong W, Yu R, Zhang P, Fan M, Zhou Z (2009) Efficient hydrogen gas production from cassava and food waste by a two-step process of dark fermentation and photo-fermentation. *Biomass Bioenergy* 33:1458–1463
- Zorya S, Morgan N, Rios LD, Hodges R, Bennett B (2011) Missing food: the case of postharvest grain losses in sub-Saharan Africa. The World Bank, Washington, DC



پیشرفت‌های اخیر در تولید بیوگاز از پسماند غذایی

چکیده: انرژی برای توسعه همه جانبه هر کشور بسیار مهم است. با افزایش شهرنشینی و صنعتی شدن، افزایش سوزاندن سوخت‌های فسیلی وجود دارد. اما سوزاندن سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو می‌شود. سوزاندن سوخت‌های فسیلی موجب افزایش گرمایش جهانی می‌شوند. گرمایش جهانی در نهایت بر سلامت انسان و کل اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، سوخت‌های فسیلی منابع انرژی تجدید ناپذیر هستند. این امر انسان را وادار می‌کند؛ تا به یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست فکر کند؛ و این منبع بتواند نیازهای انرژی را برآورده کند؛ همچنین حفاظت از محیط زیست و بازیابی مواد غذایی را به حداکثر برساند. منابع طبیعی مانند بیوگاز منابع تجدیدپذیر انرژی هستند. بیوگاز می‌تواند به جای سوزاندن سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرند. بیوگاز دارای ویژگی‌های شامل؛ سازگار با محیط، حفاظت از محیط زیست و استخراج مواد مغذی می‌باشد. هضم بی‌هوازی از پسماند آلی متنوع مانند پسماند غذایی، فضولات حیوانات، پسماند کشاورزی و لجن، بیوگاز تولید می‌کند. دی اکسید کربن و متان تولیدشده در فرآیند بی‌هوازی به بیومتان تبدیل می‌شود. بیومتان برای اهداف مختلف مانند تولید برق، سوخت پخت و پز یا سوخت حمل و نقل استفاده می‌شود. این فصل متکی به تولید بیوگاز از پسماندهای غذایی و پیشرفتهای اخیر انجام شده در فرایند با توجه مناسب به سایر جنبه‌های مرتبط است.

واژه‌های کلیدی: سوخت‌های فسیلی، گاز گلخانه‌ای، پسماندهای آلی، پسماند مواد غذایی، بیوگاز، هضم بی‌هوازی، هضم مشترک، چرخه اقتصاد

۵-۱ مقدمه

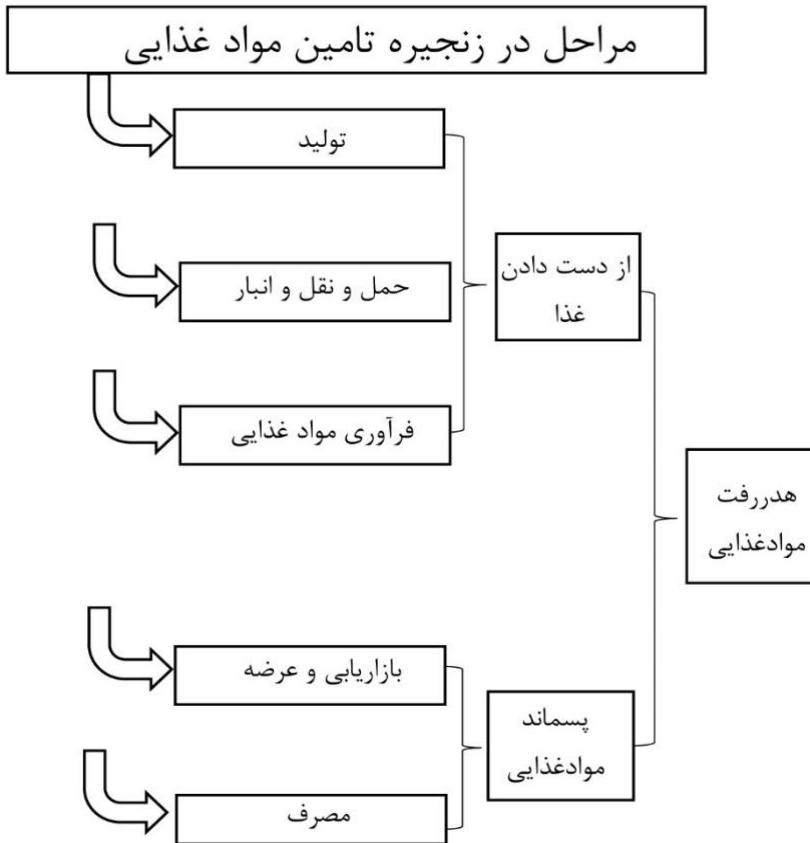
انرژی عامل مهمی در کمک به توسعه همه جانبه هر کشور است (Barnes et al. 2011; Stern 2011; Singh et al. 2021a). با افزایش جمعیت و شهرنشینی، نیاز به انرژی نیز به طور تصاعدی در حال افزایش است (Mazur 1994; Graham 2009). سوزاندن سوخت‌های فسیلی تهدید قابل توجهی برای محیط زیست و سلامت انسان است (Kataki et al. 2017; Singh et al. 2021b). سوخت‌های فسیلی به عنوان عامل اصلی گرمایش جهانی در نظر گرفته می‌شوند. طبق گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، حدود ۷۶ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای ایالات متحده ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۱۶ است. علاوه بر این، سوخت‌های فسیلی منابع انرژی تجدیدناپذیر هستند؛ بنابراین باید یک جایگزین برای پاسخگویی به نیازهای انرژی به طور کامل جستجو و بررسی شود؛ تا اثرات نامطلوب بر محیط زیست نیز کاهش یابد (Singh et al. 2021c, d). به جز نیاز به انرژی، یکی دیگر از عواملی که با افزایش صنعتی شدن و شهرنشینی افزایش می‌یابد، تولید سالانه زباله توسط کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه است. این پسماندها انواع مختلفی دارند، که از پسماند آلی خانگی تا پسماند الکترونیکی را شامل می‌شوند. این پسماند، هنگامی که در محل‌های دفن زباله تلنبار یا سوزانده می‌شوند، گازهای خطرناک قوی منتشر می‌کنند. این گازهای خطرناک، منجر به تغییرات نامطلوب مرتبط با آب و هوا می‌شود. پسماند جامد شهری که عمدتاً از پسماند خانگی تشکیل شده است، ممکن است به داخل آب‌ها نفوذ کرده و باعث آلودگی آب شوند. بنابراین در کنار نیاز انرژی، روش مدیریت پسماند هر کشوری بر جایگاه اجتماعی-اقتصادی آن اثر دارد (Singh et al. 2020a, b, c, d; Chaturvedi et al. 2020). از این رو، منبع انرژی جایگزین باید ضمن کاهش اثرات مضر بر محیط زیست و تضمین مدیریت کارآمد پسماند، نیازهای انرژی را تامین کند. به طور خلاصه، منبع انرژی باید چرخه اقتصاد را گسترش دهد (Singh et al. 2016, 2021b). منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین‌های خوبی برای تغییر هستند (Koberg and Gedanken 2012; Singh et al. 2020e)، و بیوگاز یکی از جایگزین‌های بالقوه و کارآمد است. در دسترس بودن آسان زیست توده، آن را به یک منبع انرژی تجدیدپذیر بسیار بالقوه تبدیل می‌کند. زیست توده می‌تواند به میزان قابل توجهی نیاز انرژی جهان را تامین کند (Perea-Moreno et al. 2019). هضم بی‌هوازی مواد آلی با کمک میکروارگانیسم‌ها، بیوگاز تولید می‌کند. مواد آلی مختلف می‌توانند برای تولید بیوگاز، مانند زباله‌های غذایی، کود و مواد گیاهی، به عنوان ماده اولیه استفاده شوند (Singh et al. 2017, 2020f; Yadav et al. 2019).

۵-۲ پسماند مواد غذایی

هیچ اصطلاح قطعی برای اتلاف مواد غذایی و پسماند وجود ندارد (Abdelradi 2018). محققان و نهادهای مختلف پسماند مواد غذایی را به روشهای مختلف درک میکنند؛ و بر این اساس تعاریف خود را مطرح میکنند. طبق تعریف سازمان خواربار و کشاورزی، پسماند غذایی به معنای دور انداختن مواد غذایی است. این پسماند در گذشته برای مصرف انسان مناسب بوده، اما پس از مدتی فاسد شده و یا تاریخ انقضای آنها گذشته است (FAO 2013). اتلاف غذا اصطلاح دیگری است. این اصطلاح گاهی اوقات به جای پسماند غذایی استفاده می‌شود. اما این دو اصطلاح در معنای تحت اللفظی اندکی با هم تفاوت دارند. سازمان خواربار و کشاورزی، اتلاف غذا را به عنوان «ماده غذایی که در گذشته قابلیت مصرف برای انسان داشته، اما به تدریج کیفیت خود را از دست داده و خشک شده است» تعریف می‌کند. از دست دادن مواد غذایی و زباله‌های مواد غذایی به طور مشترک به عنوان اتلاف مواد غذایی و پسماند شناخته شده است. در طول زمان‌های مختلف، تعاریف دیگری از اتلاف مواد غذایی و پسماند نیز بر اساس درک نهادهای مختلف وجود دارد.

سپس، می‌توان غذای هدر رفته را دور انداخت؛ یا از آن استفاده کرد. روش‌های دفع شامل کمپوست‌سازی، هضم بی‌هوازی، تولید انرژی زیستی، سوزاندن، تولید همزمان انرژی حرارتی و برق، شخم‌زدن محصولات و عدم برداشت آنها^۱، و دفع در مکان‌های دفن زباله، فاضلاب یا دورریختن در دریا است (Singh and Mishra 2020; Östergren et al. 2014). بنابراین وقتی کیفیت یا کمیت غذا به حد نامناسبی کاهش یابد، می‌توان آن را به عنوان غذای هدر رفته و پسماند غذایی در نظر گرفت. این پسماندها را نمی‌توان برای مصرف انسان استفاده کرد. این تفاوت ناشی از در نظر گرفتن عوامل خارجی و ارتباط متقابل بین اصطلاحات "پسماند غذا" و "اتلاف غذا" است. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی، اتلاف غذا عمدتاً در سه مرحله مقدماتی اولیه زنجیره تامین غذا اتفاق می‌افتد؛ اما ضایعات غذا کم و بیش مربوط به مرحله آخر مصرف مرتبط است. همچنین، برخی از نهادهای کاملاً نامناسب شدن کمیت یا کیفیت غذا را به پسماند مواد غذایی مرتبط میکنند؛ و مفهوم اتلاف مواد غذایی را به طور کامل از بین می‌برند. پسماند غذایی تولید شده از طریق زنجیره غذایی در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

۱. محصولات یا موادی که به علت عدم استفاده یا عدم نیاز، در محل تولید خود باقی می‌مانند و به صورت طبیعی تجزیه می‌شوند.



شکل ۵-۱. ساختار اتلاف مواد غذایی و پسماند در زنجیره تامین مواد غذایی

۵-۲-۱ ترکیب پسماند مواد غذایی

ترکیب دقیق با نوع پسماند غذایی و ترکیبات آن متفاوت است. ترکیب پسماند مواد غذایی عمدتاً شامل چربی، پروتئین، کربوهیدرات و مقدار کمی ترکیبات معدنی هستند (Paritosh et al. 2017).

۵-۲-۲ اثرات تلنبار کردن و دفع زباله‌های مواد غذایی

بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی سالانه، ۱/۳ میلیارد تن (یک سوم) مواد غذایی در سراسر جهان هدر می‌رود یا از بین می‌رود (Gustavsson et al. 2011; Ishangulyyev et al. 2019). تجمع این مواد غذایی هدر رفته اثرات نامطلوب شدیدی دارد. اتلاف و پسماند مواد غذایی به

طور جدی بر اقتصاد، فقر و منابع طبیعی تأثیر می‌گذارد. امنیت غذایی نیز به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ زیرا اتلاف و پسماند غذا باعث کاهش دسترسی به غذا برای مصرف انسان می‌شود (Abiad and Meho 2018; Lipinski et al. 2013; Capone et al. 2014).

۵-۲-۱-۲-۵ اثرات زیست محیطی

- به طور کلی، حیوانات، گیاهان و اکوسیستم تحت تأثیر همزمان تولید مواد غذایی و اتلاف قرار می‌گیرند.
- فرآوری مواد غذایی به میزان قابل توجهی از انرژی و مواد استفاده می‌کند.
- غذاهای غیرفصلی و وارداتی موجب حمل و نقل و مصرف انرژی اضافی می‌شود. این امر به محیط زیست فشار وارد می‌کند.
- اتلاف و هدر رفت مواد غذایی باعث از دست رفتن منابع آب، زمین و انرژی می‌شود؛ زیرا زنجیره تامین مواد غذایی به همه این عوامل نیاز دارد.
- کیفیت زمین نیز مستقیماً تحت تأثیر تولید و عرضه مواد غذایی است؛ زیرا تولید و عرضه مواد غذایی منجر به فرسایش خاک، کاهش مواد مغذی، بیابان‌زایی و جنگل‌زدایی می‌شود.
- ردپای کربن پسماند مواد غذایی نشان می‌دهد، که تقریباً $\frac{3}{4}$ میلیارد تن دی اکسید کربن سالانه در گازهای گلخانه‌ای اتمسفر متراکم می‌شود (Paritosh et al. 2017).
- سوزاندن و تلبارکردن پسماند مواد غذایی در فضای باز، روش‌های متداول برای دفع آنها به عنوان زباله‌های جامد شهری است (Liu et al. 2015). این عامل می‌تواند معایب زیست محیطی و بهداشتی مختلفی ایجاد کند (Rushton 2003; Capson-Tojo et al. 2011; Harrad and Harrison 1996; Zagozewski et al. 2016).
- هنگامی که زباله‌های مواد غذایی در محل‌های دفن زباله دفع می‌شوند، مقدار زیادی گاز گلخانه‌ای و متان نیز تولید می‌شود. این گازها ۲۳ تا ۲۵ برابر قابلیت گاز دی اکسید کربن در ایجاد گرمایش جهانی است (Kleerebezem et al. 2015; Parry et al. 2007).
- شیرابه‌های محل‌های دفن زباله می‌توانند به طور قابل ملاحظه‌ای باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی شوند (Gupta and Arora 2016).
- هنگامی که پسماند مواد غذایی حاوی رطوبت بالا سوزانده می‌شوند، دیوکسین‌ها آزاد

می‌شوند (Katami et al. 2004; Shibamoto et al. 2007). دیوکسین‌ها همچنین می‌توانند چندین مشکل زیست محیطی ایجاد کند.

- ارزش اقتصادی پیش نیازها نیز به دلیل استخراج نادرست مواد مغذی به دلیل سوزاندن کاهش می‌یابد. بنابراین، روش‌های مناسب مدیریت زباله باید طراحی شوند (Ma et al. 2008).
- همه این عوامل می‌توانند منجر به تغییرات نامطلوب آب و هوایی شوند. تغییرات آب و هوا ممکن است پیامدهای سلامتی مهمی داشته باشد.

۵-۲-۳ روش‌های مدیریت زباله برای پسماند مواد غذایی

پسماند مواد غذایی تهدیدی برای جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی و زیبایی شناختی کشور است. با در نظر گرفتن دامنه آسیب‌هایی که می‌تواند ایجاد کند، انجام روش‌هایی برای مدیریت موثر پسماند مواد غذایی و طراحی روش‌هایی برای کاهش تولید پسماند مواد غذایی ضروری است.

برخی از روش‌های مدیریت پسماندهای غذایی عبارتند از: (Dung et al. 2014):

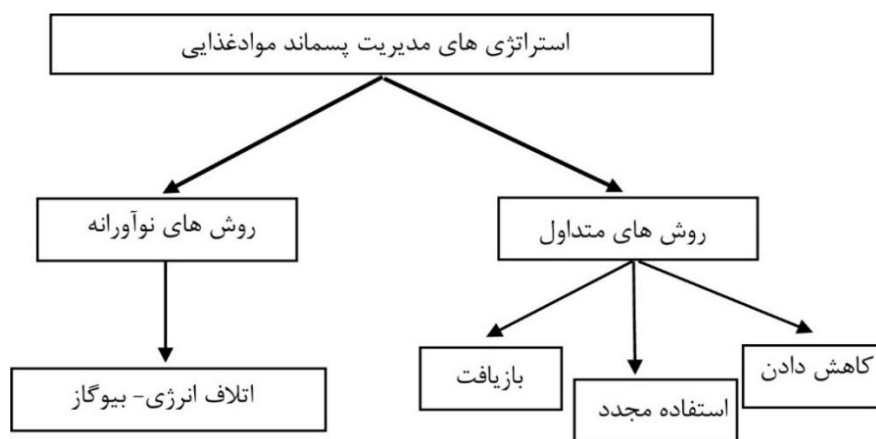
(الف) کاهش در منبع: این روش بهترین و متداول‌ترین روش برای مدیریت پسماند مواد غذایی است. کاهش پسماند مواد غذایی توسط مردم انجام می‌شوند؛ تا اتلاف و پسماند غذا کاهش یابد. چندین روش را می‌توان برای ترویج حذف پسماند مواد غذایی در منبع انتخاب کرد. بعضی از آنها عبارتند از:

- تبلیغات: سازمان‌های مختلف می‌توانند با فعالیت‌ها و تلاش‌های برنامه‌ریزی شده متعدد در سیستم عامل‌های رسانه‌های اجتماعی، وبسایت‌ها یا تابلوهای اعلانات و ...، در مورد کاهش پسماند غذایی آگاهی ایجاد کنند و آن را ترویج کنند.
- برنامه‌های مختلف اطلاع‌رسانی: موسسات می‌توانند برنامه‌های تبلیغاتی خود را طراحی کنند و نمایندگان کاهش اتلاف مواد غذایی را ترویج دهند.

(ب) استفاده مجدد: این روش شامل توزیع مجدد مواد غذایی استفاده نشده یا فروخته نشده است. در این روش، سازمان‌ها و موسسات مختلف مربوطه استفاده مجدد از مواد غذایی مناسب و سالم را که به هر دلیلی برای دورریختن در نظر گرفته می‌شوند، تشویق می‌کنند. موسسات مربوطه (سازمان‌های عمومی مختلف) می‌توانند مواد غذایی مازاد خود را به آژانس‌ها یا مراکز توزیع مواد غذایی اهدا کنند.

ج) بازیافت: زباله‌های مواد غذایی که نمی‌توان از آنها استفاده کرد، باید برای بازیافت تصفیه شوند. برای این کار باید جداسازی زباله‌های مواد غذایی از مواد زائد غیر غذایی در خود نقطه تولید انجام شود. کمپوست کردن پسماند مواد غذایی با کمک کرم‌ها نیز در منازل و اماکن صنعتی برای تشکیل ورمی کمپوست انجام می‌شود.

د) استخراج انرژی: زباله‌های غذایی که نمی‌توانند با بازیافت پردازش شوند، باید از طریق تخریب برای تولید انرژی در نیروگاه‌های انرژی استفاده شوند. چندین روش فنی نوآورانه برای تولید انرژی زیستی و استخراج منابع زیستی با روش چرخه اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. هضم بی‌هوازی پسماند مواد غذایی برای تولید بیوگاز به دلیل استفاده چند منظوره آن به عنوان سوخت برای پخت و پز یا تولید الکتریسیته محبوبیت پیدا کرده است؛ و پیشرفت‌های زیادی در این فناوری انجام شده است (Lee et al. 2020). هضم مشترک نیز در حال بررسی است (Cecchi and Cavinato 2019). فرآیند کلی مدیریت پسماند و کاربرد آن در تولید انرژی زیستی در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.

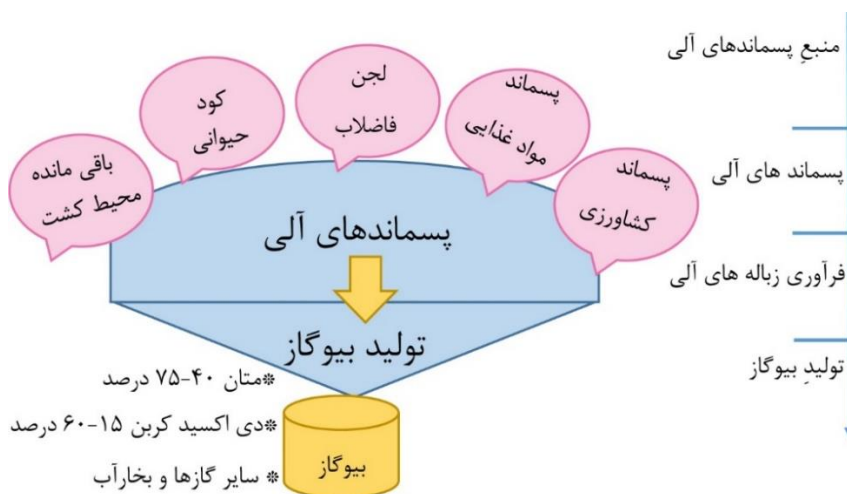


شکل ۵-۲. روش‌های مدیریت زباله (معمولی و نوآورانه)

۵-۳ بیوگاز

امروزه تقاضا برای یک منبع انرژی تجدیدپذیر و پاک نیز به طور متناسب برای حفاظت از محیط زیست در حال افزایش است. بیوگاز یکی از منابع انرژی تجدید پذیر و پاک است. بیوگاز می‌تواند برای محیط زیست مفید باشد و انرژی بهتر و دوستدار محیط زیست را برای ما فراهم کند. بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی زیست توده تولید می‌شود. منابع مختلف زباله‌های آلی به

عنوان مواد اولیه برای تولید بیوگاز استفاده می‌شود (Agarwal et al. 2005; Bhatt and Tao 2021; BETO 2017; Mohanty et al. 2021). منابع تولید بیوگاز در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵. منابع مختلف زباله‌های آلی برای تولید بیوگاز

بیوگاز عمدتاً حاوی متان و دی اکسید کربن است. در بیوگاز تصفیه نشده، درصد متان ممکن است از ۴۰ تا ۷۵ درصد و دی اکسید کربن از ۱۵ تا ۶۰ درصد حجمی متغیر باشد.

باقی مانده گاز عمدتاً از دی اکسید کربن به همراه سایر گازها و بخار آب تشکیل شده است (Bhatt and Tao 2020).

می‌توان از بیوگاز به عنوان سوخت استفاده کرد. بیوگاز را می‌توان تصفیه یا به بیومتان تبدیل کرد. بیومتان به عنوان گاز طبیعی تجدیدپذیر نیز شناخته می‌شود. تبدیل بیوگاز به بیومتان قابلیت حمل و نقل در شبکه‌های گاز طبیعی و سیستم‌های نقل و انتقال موجود را فراهم می‌کند. از بیومتان می‌توان برای سوخت حمل و نقل و مصارف مختلف صنعتی استفاده کرد (Bhatt and Tao 2020; Kleerebezem et al. 2015). میکروپها نقش بسیار مهمی در تولید بیوگاز از زباله‌های زیستی دارند. میکروپها از زیست توده تغذیه می‌کنند؛ و از طریق فرآیند هضم بی هوازی انرژی آزاد می‌کنند. این باکتری‌های بی هوازی را می‌توان به طور طبیعی در آب مانند؛ دریاچه‌ها و مرداب‌ها، خاک‌ها و در روده حیوانات و انسان‌ها یافت (جدول ۱-۵).

جدول ۵-۱. ترکیب معمولی بیوگاز و غلظت آنها (منبع: Adebayo et al. 2015)

ردیف	ترکیب معمولی بیوگاز	فرمول	غلظت (حجمی به حجمی)
۱	متان	CH ₄	۴۰-۷۵ درصد
۲	کربن دی اکسید	CO ₂	۱۵-۶۰ درصد
۳	سولفید هیدروژن	H ₂ S	۰-۵۰۰۰ ppm
۴	نیتروژن	N ₂	۰-۵ درصد
۵	هیدروژن	H ₂	به مقدار جزئی
۶	رطوبت	H ₂ O	۱-۵ درصد
۷	مونوکسید کربن	CO	۰-۳ درصد
۸	اکسیژن	O ₂	کمتر از ۲ درصد
۹	سایر گازهای جزئی		کمتر از ۲ درصد

تشکیل و جمع آوری بیوگاز را می‌توان از طریق پسماندهای جامد شهری در محل‌های دفن پسماند به دست آورد؛ یا محصول را می‌توان در هاضم‌های بی هوازی تحت شرایط کنترل شده به دست آورد. بیوگاز برای مقاصد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و ماده هضمی (موادی که پس از اتمام هضم بی هوازی باقی می‌ماند) که غنی از مواد مغذی است، می‌تواند به عنوان کود استفاده شود.

۵-۳-۱ نیروهای محرک برای تولید بیوگاز

محرک‌های زیادی برای تولید بیوگاز وجود دارد. برخی از نیروهای محرک مهم در تولید بیوگاز عبارتند از (Hasan et al. 2020):

الف) محرک‌های اجتماعی:

- قابلیت بازار انرژی‌های تجدیدپذیر
- شناخت مزایای انرژی سبز از نظر سیاسی
- افزایش آگاهی کاربران نهایی در مورد انرژی زیستی
- کاهش احتمالی انتشار گازهای گلخانه‌ای

ب) محرک‌های فنی:

- روش‌های بهره برداری کارآمد از زیاله
- انواع مواد اولیه موجود برای تولید بیوگاز
- ج) محرک‌های اقتصادی:
- به دست آوردن ارزش‌های تجاری از پروژه‌های بیوگاز
- کمک مالی
- در دسترس بودن مواد اولیه ارزان قیمت برای تولید انرژی
- سرمایه گذاری سودآور

د) محرک‌های سیاسی:

- سازگاری با تغییرات اقلیمی
- تشکیل جلسه با اهداف توسعه پایدار

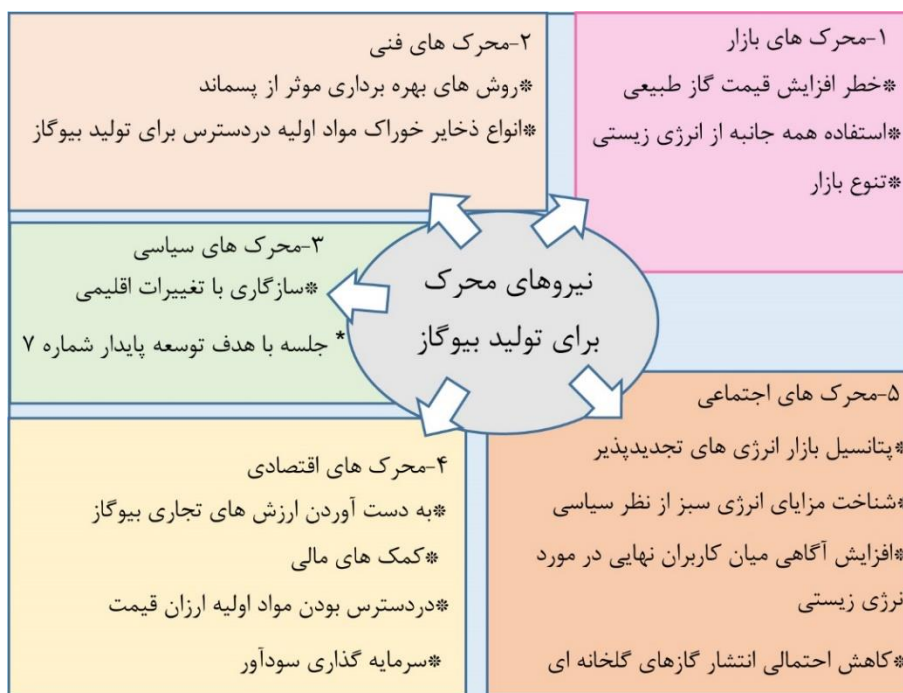
ه) محرک‌های خرید و فروش:

- خطر افزایش قیمت گاز طبیعی
- استفاده همه جانبه از انرژی زیستی
- تنوع بازار

نیروهای محرک فوق‌الذکر برای تولید بیوگاز بسیار مهم هستند. این نیروهای محرکه مواد اولیه تولید را فراهم می‌کنند و بازده را افزایش می‌دهند. نیروهای محرکه مهم در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

۵-۳-۲ تولید بیوگاز از پسماند مواد غذایی: دستورالعمل

مواد اولیه تولید بیوگاز می‌تواند انواع مختلفی از پسماند آلی (پسماند مواد غذایی، پسماند کشاورزی، کود و ...) باشد. بیوگاز نشان دهنده انرژی‌های تجدید پذیر و پاک است. همچنین، بیوگاز چرخه اقتصاد را با استخراج مواد مغذی آلی در طول فرآیند تولید گسترش می‌دهد (Mohanty et al. 2021; Ramos-Suarez et al. 2019; Mateescu and Dima 2020;) (Martinov et al. 2020; Kumar et al. 2020).



شکل ۵-۴. نیروهای محرک مختلف برای تولید بیوگاز

فرآیند تولید بیوگاز عمدتاً به مراحل متوالی زیر تقسیم می‌شود:

(الف) آماده سازی پسماند مواد غذایی

(ب) هضم بی هوازی پسماند

(ج) تبدیل بیوگاز به بیومتان

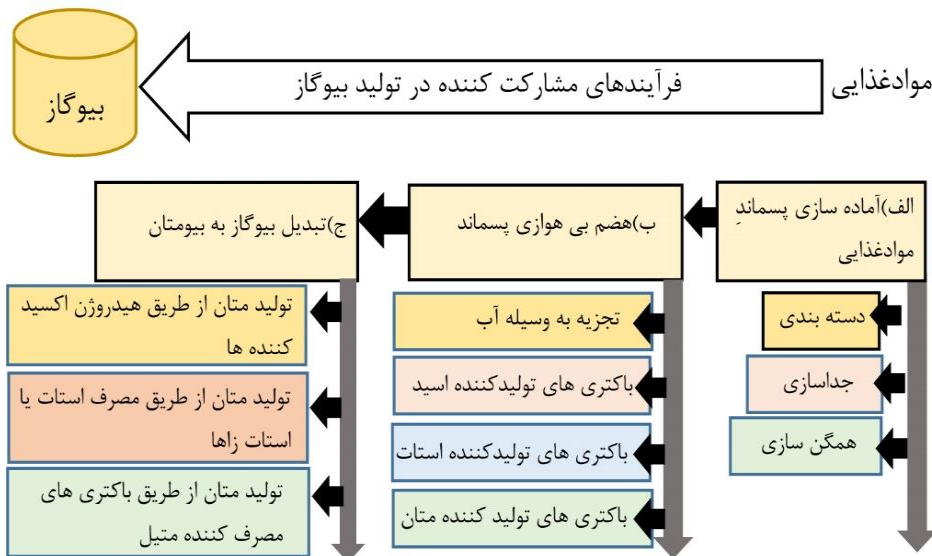
(د) استخراج مواد در هاضم (مواد باقی مانده پس از اتمام هضم بی هوازی)

مشارکت فرآیندها در تولید بیوگاز در شکل ۵-۵ ذکر شده است.

۵-۳-۲-۱ آماده سازی پسماند مواد غذایی

به طور کلی، پسماندهای مواد غذایی خانگی به غیر از کاهش اندازه ذرات به آماده سازی دیگری نیاز ندارند. آماده سازی، برای تسهیل تجزیه میکروبی در فرایند مقدماتی، نیاز است.

انواع آماده سازی که معمولاً استفاده می‌شود عبارتند از (Bankset al. 2018):



شکل ۵-۵. مشارکت فرایندها در تولید بیوگاز

تفکیک کردن: حذف مواد غیر قابل تجزیه و بی اثر از پسماند مواد غذایی در این فرآیند نقش دارد. اگر در منبع تفکیک نشود، این مواد می توانند بر روند فرایندهای فرعی یا کیفیت هضم تأثیر منفی بگذارند.

جدا کردن: جداسازی مکانیکی را می توان در فرآیند حذف هر گونه آلودگی بیشتر اعمال کرد. طراحی روش فنی جداسازی به نوع پسماند مواد غذایی، ترکیبات غذایی و مجموعه داده های گذشته در صورت وجود بستگی دارد.

یکسان سازی: یکسان سازی یک فرآیند ضروری است؛ زیرا باعث تخریب می شود؛ و از ته نشین شدن یا تشکیل لایه در داخل هاضم جلوگیری می کند. یکسان سازی شامل کاهش اندازه و سپس تبدیل به مایع از پسماند زیستی برای مخلوط کردن و پمپاژ آسان است.

اولتراسونیک (در مقیاس تجاری) و آماده سازی های مکانیکی (مانند استفاده از مایکروویو، اختلال در فشار بالا) و سیتتیک الکتریکی (عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی یا استفاده از نمونه های اولیه در فروش کوچک) برای بهبود هیدرولیز در طول هضم بی هوازی در نظر گرفته شده است (Eskicioglu et al. 2008; Pazos et al. 2009; Tyagi and Lo 2011; Tyagi et al. 2014).

استفاده از مواد شیمیایی، قلیایی، اسیدی، ازن زنی (Neumann et al. 2016; Le et al. 2019)، کاربرد فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (Martínez-Huitle and Ferro 2006; Zhen et al. 2017; Xu and Dai 2020; Park (Feki et al. 2020) و روشهای بیولوژیکی (et al. 2018) یا ترکیبی از این روش‌های فنی، برای افزایش اثربخشی محلول استفاده می‌شود (Sevillano et al. 2021).

۵-۳-۲ هضم بی‌هوازی

پس از انجام آماده سازی، ماده اولیه برای تجزیه و تولید بیوگاز وارد هاضم بی‌هوازی می‌شود. سپس بیوگاز در مخزن ذخیره می‌شود. بیوگاز، غنی از متان است. بیوگاز می‌تواند با توجه به استفاده نهایی، مانند استفاده در سوخت حمل و نقل، تولید برق و سایر کاربردها، به طور قابل توجهی بهبود یابد. بیوگاز، برای کاهش مقادیر گوگرد به واحد گوگرد زدایی منتقل می‌شود. مواد آلی که بعد از هضم هنوز باقی می‌مانند، از طریق فرآیندی به نام هاضم، استخراج می‌شوند. این مواد ممکن است از طریق پاستوریزه کردن، سپس کمپوست یا جداسازی جامد خشک و مرطوب، فرآوری شود. همچنین، این مواد از نظر مواد مغذی غنی است؛ و می‌تواند به عنوان کود استفاده شود (Goswami et al. 2016; Korbag et al. 2020; Shah et al. 2017; Speece 1983). مراحل مربوط به هضم بی‌هوازی به صورت زیر نشان داده می‌شود:

الف) هیدرولیز: تجزیه مواد آلی (مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و چربی‌ها) به ساده‌ترین شکل (به ترتیب گلوکز، اسیدهای آمینه و اسیدهای چرب) در این فرآیند انجام می‌شود. باکتری‌های هیدرولیتیک و سلولولیتیک مختلف در این فرایند مشارکت می‌کنند. باکتری *استوویبریو*^۱، *باکتریوئیدها*^۲ و *سلولولیتیکوس*^۳ برخی از این نمونه‌ها هستند.

ب) تولیدکننده اسید: تجزیه ساده‌ترین مولکول‌های آلی مانند اسیدهای آمینه، گلوکز و اسیدهای چرب را به الکل‌ها و اسیدهای چرب فرار تبدیل می‌کند. هیدروژن سولفید، آمونیاک و دی‌اکسید کربن به عنوان محصولات جانبی آزاد می‌شوند. مشارکت میکروب‌هایی که ممکن است در این مرحله استفاده شوند، بسیار زیاد است. باکتری‌های تولیدکننده اسید مانند *پیتوکوک* و *کمپیلوباکتر* و قارچ‌ها ممکن است در این مرحله شرکت کنند.

1. *Acetovibrio*
2. *Bacteroidetes*
3. *Cellulolyticus*

ج) تولید کننده استات: الکل‌ها، اسیدهای چرب و برخی اسیدهای آمینه به اشکال ساده تری اکسید می‌شوند. به علاوه از گاز هیدروژن، به طور اصلی استات و دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. در این مرحله، همکاری نزدیک بین میکروب‌هایی که در اکسایش شرکت می‌کنند؛ و میکروب‌هایی که در مرحله میانی بعدی فعالیت می‌کنند؛ (تولیدکننده متان) مشاهده می‌شود. نمونه‌هایی از میکروب‌هایی که می‌توانند استات تولید کنند، عبارتند از: *سنتروفوموناس ولفی*^۱، *سنتروفوباکتر وولینی*^۲، *کلستریدیوم* و

د) تولید متان: این مرحله نهایی و محدود کننده سرعت هضم بی‌هوازی است. این مرحله، منجر به تولید متان (محصول اولیه)، هیدروژن، دی‌اکسید کربن و سایر گازها (به مقدار کم) می‌شود. حداقل شش مواد اولیه مختلف را می‌توان از طریق شش مسیر مختلف برای تولید گاز متان توسط باکتری‌های تولید کننده متان استفاده کرد.

شش مواد اولیه عبارتند از (Slonczewski and Foster 2014):

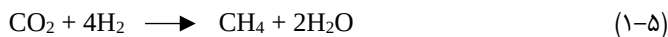
۱. دی‌اکسید کربن
۲. متانول
۳. اسید فرمیک
۴. متیل آمین
۵. دی‌متیل سولفات
۶. اسید استیک

رایج‌ترین مسیر مورد استفاده کاهش دی‌اکسید کربن/هیدروژن است. این مسیر منجر به تبدیل دی‌اکسید کربن به گاز متان می‌شود.

سه مسیر بیوشیمیایی تولید متان:

۱- ارگانوسم‌های تولید کننده متان هیدروژنوتروفيک: ارگانوسم‌های تولید کننده متان هیدروژنوتروفيک مانند *متانوباکتریوم آربوفیلیکوم*^۳ می‌باشد. این ارگانوسم در این مسیر مشارکت می‌کند. واکنش تولید بیوگاز در رابطه (۵-۱) نشان داده شده است.

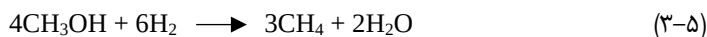
1. *Syntrophomonas wolfeii*
 2. *Syntrophobacter wolinii*
 3. *Methanobacterium arbophilicum*



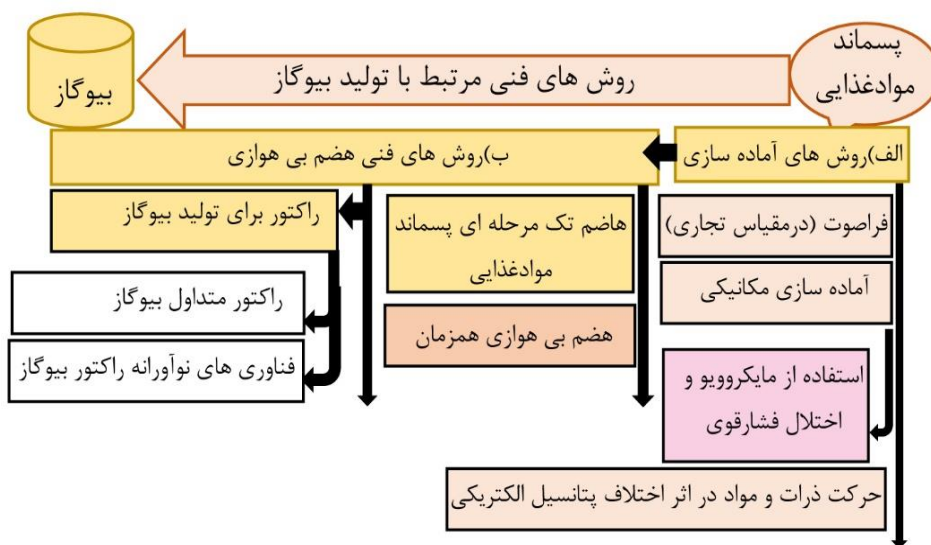
۲- ارگانیسم‌های تولیدکننده متان استوتروفیک یا استوکلاستیک: ارگانیسم‌های تولیدکننده متان استوتروفیک یا استوکلاستیک مانند *متانوسارسینا بارکری*^۱ در این مسیر مشارکت می‌کنند. واکنش شیمیایی تولید متان در رابطه (۲-۵) نشان داده شده است.



۳- ارگانیسم‌های تولیدکننده متان متیلوتروفیک: واکنش شیمیایی تولید بیوگاز در رابطه (۳-۵) نشان داده شده است.



روش‌های فنی مشارکت کننده در تولید بیوگاز در شکل ۵-۶ خلاصه شده است.



شکل ۵-۶. روش‌های فنی مشارکت کننده در تولید بیوگاز

1. *Methanosarcina barkeri*

۵-۳-۲-۳ عوامل موثر بر تولید بیوگاز

با توجه به مشارکتهای مختلف میکروبی در مراحل مختلف بیوشیمیایی مرتبط با تولید بیوگاز بی هوازی، آشکار است که عوامل متعددی بر رشد میکروبی و به تبع آن بر کل فرآیند هضم بی هوازی تأثیر دارند. این عوامل در نهایت بر بازده بیوگاز تأثیر می‌گذارد. برخی از عوامل مهم عبارتند از (Goswami et al. 2016; Korbag et al. 2020):

- **دما:** فعالیت‌های بی هوازی مرتبط با تجزیه پسماندهای آلی به بیوگاز وابسته به دما هستند. مشخص شده است که سه محدوده دما عمدتاً برای فرآیند هضم بی هوازی استفاده می‌شود. محدوده دمای میانه، ۲۵-۴۰ درجه سانتی گراد، محدوده دما سرد، کمتر از ۲۰ درجه سانتی گراد، و محدوده دمای گرم، ۴۵-۶۰ درجه سانتی گراد است. در مطالعات قبلی مشاهده شده است که بی هوازی‌ها در محدوده دمای گرم و دمای میانه بیشترین فعالیت را دارند (Kumar 2012).

- **pH:** فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک و کل فرآیند تجزیه بی هوازی تحت تأثیر pH قرار می‌گیرد. محدوده pH ۶/۵ تا ۸/۲ برای تولید متان موثر است؛ اما هیدرولیز در pH ۵/۵ و ۶/۵ برای ارگانیسم‌های تولید کننده اسید مناسب است (Lee et al. 2009).

- **نسبت کربن به نیتروژن:** محدوده بین ۲۰:۱ و ۳۰:۱ برای هضم بی هوازی زباله‌های آلی ایده آل است؛ و ۳۰:۱ نسبت عملیاتی بهینه است (Korbaget al. 2020). اما در عمل مواد اولیه دارای درصد نسبت کربن به نیتروژن بالاتر یا پایین تر هستند؛ و هضم مشترک باعث بهبود تعادل این نسبت می‌شود (Goswami et al. 2016).

۵-۳-۲-۴ سیستم‌های هضم بی هوازی

هاضم تک مرحله‌ای پسماند مواد غذایی:

پسماند غذایی به عنوان مواد اولیه برای هضم مناسب عمل می‌کنند؛ زیرا بسیار تجزیه پذیر هستند؛ و قابلیت تولید متان بالایی دارند. اما پس از عملیات طولانی مدت، تولید متان مهار می‌شود؛ همچنین افزایش اسیدهای چرب فرار مشاهده می‌شود. گاهی اوقات افت pH هاضم و نقص در فرآیند هضم نیز در شرایط شدید مشاهده می‌شود. این یافته می‌تواند عمدتاً به غلظت بالای نیتروژن در پسماند مواد غذایی مرتبط باشد. نیتروژن به آمونیاک تجزیه می‌شود. آمونیاک برای رشد بی‌هوازی‌ها ضروری است، اما غلظت بالایی از آمونیاک بازدارنده است.

همچنین، ارگانیسیم‌های تولید کننده متان استوکلاستیک نسبت به آمونیاک حساس تر هستند. بنابراین، جایگزین ارگانیسیم تولیدکننده متان استوکلاستیک با ارگانیسیم تولیدکننده متان هیدروژنوتروفیک یک راه حل بالقوه برای این مشکل با هاضم تک مرحله ای فراهم می‌کند (Khalid et al. 2011; Mathew et al. 2015; Lv et al. 2013; Banks et al. 2018).

هضم مشترک بی‌هوازی و غنی سازی تولید بیوگاز: روش‌های فنی هضم مشترک بی‌هوازی پسماند مواد غذایی به دلیل مزایای متعدّدشان اهمیت بیشتری دارند. لجن حیوانی و لجن فاضلاب به طور کلی دارای رطوبت بالا و قابلیت کم برای تولید متان هستند؛ بنابراین عملکرد هضم بی‌هوازی عمدتاً به زمان ماند هیدرولیکی بستگی دارد. و به نرخ بارگذاری آلی بستگی ندارد. در نتیجه، هاضم‌ها می‌توانند ظرفیت بارگذاری اضافی را داشته باشند؛ زیرا زمان ماند به طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد. هضم مشترک پسماند غذایی باعث افزایش میزان تولید بیوگاز می‌شود. علاوه بر این، دارای امکانات اقتصادی است؛ و می‌تواند برخی از مشکلات مربوط به روش‌های فنی هاضم تک مرحله ای، مانند وجود مواد سمی، عدم تعادل مواد مغذی یا مواد مقاوم در خوراک را برطرف کند (Yentekakis and 2018 Bankset al. 2019; Adnan et al. 2017; Goula).

عوامل مختلفی باید برای هضم مشترک بی‌هوازی پسماندهای غذایی مانند مواد اولیه مناسب و نسبت مخلوط مناسب برای دستیابی به بهینه در نظر گرفته شود؛ و ترکیبات مضر در حالی که تولید متان را افزایش می‌دهند، رقیق می‌شوند.

تنظیم متعادل مواد مغذی موجب بهبود تثبیت مواد آلی می‌شود. با افزودن مواد اولیه مناسب می‌توان به مقرون به صرفه بودن دست یافت (Kumar et al. 2009; Kumar and Goel 2009; Pattnaik and Reddy 2010; Sevillano et al. 2021; Mata- Alvarez et al. 2017; Hagos et al. 2014). تولید بیوگاز را می‌توان با هضم مشترک مواد اولیه مختلف با کود حیوانی نسبت به هضم تک مرحله ای مواد اولیه از ۲۵ درصد به ۴۰۰ درصد افزایش داد (Shah et al. 2015). استفاده از مخلوط کود خوک و گلیسرول در دماهای بین ۲۵۰ درجه سانتیگراد تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد به نسبت بیست و چهارم به یک، تقریباً ۴۰۰ درصد بیشتر بیوگاز نسبت به استفاده از کود خوک به تنهایی تولید می‌کند (Rabii et al. 2019; Shah et al. 2018; Meiramkulova et al. 2015).

مواد اولیه مانند کاه گندم، جلبک دریایی، جلبک و ساقه ذرت که نسبت کربن به نیتروژن بیشتر از ۵۰ دارند، به راحتی قابل هضم هستند. در حالی که پسماندهای آشپزخانه و مواد غذایی، کود خوک و کود مرغ که نسبت کربن به نیتروژن کمتری دارند، ممکن است هضم آنها دشوارتر باشد. تعادل مواد مغذی برای جلوگیری از اختلال و عدم عملکرد صحیح سیستم و کاهش تولید بیوگاز به دلیل نسبت نامناسب کربن به نیتروژن اهمیت دارد (Talyan et al. 2017; Ali Shah et al. 2014; Hagos et al. 2017; Alqaralleh et al. 2017; 2008; Panpong et al. 2014; Sosnowski et al. 2003).

لجن فاضلاب به عنوان مواد اولیه کمکی برای حمایت و گسترش تخریب آلی به طور گسترده در بسیاری از آثار متون ارزیابی و گزارش شده است (Zhao and Kugel 1996; Kim et al. 2019; Moestedt et al. 2019; Cecchi and Cavinato 2019; Gomez et al. 2006; 2003; Mu et al. 2020).

اعتقاد بر این است که افزودن مواد رسانا مانند کربن فعال، زغال سنگ و گرافیت شرایط مطلوبی را برای انتقال الکترون بین گونه‌ها فراهم می‌کند. همچنین، افزودن مواد رسانا تخریب پروتئین‌ها و اسیدهای چرب فرار نیز افزایش می‌یابد (Sevillano et al. 2021; Arenas et al. 2020; Lu et al. 2020).

مزایای کلی روش فنی‌های هضم همزمان بی‌هوازی (Rabii et al. 2019):

- افزایش عملکرد متان در واحد حجم هضم کننده
- اثرات هم افزایی بر میکروارگانیسم‌ها
- پایداری اقتصادی
- تعادل مواد مغذی
- رقیق سازی مواد سمی

۵-۳-۲-۵ مزایای هضم بی‌هوازی

با توجه به قابلیت جهانی بیوگاز در سال ۲۰۱۹، فناوری‌های هضم بی‌هوازی می‌توانند به طور قابل توجهی در دستیابی به برخی از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد - اهداف شماره ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ کمک کنند. برخی از مزایای هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی، تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست است (Sevillano et al. 2021; Rekleitis et al. 2020).

- کاهش تغییرات آب و هوایی
- کمک به چرخه اقتصاد
- بهبود کیفیت هوای شهری
- کمک به امنیت غذایی
- بهبود بهداشت و سلامت از طریق مدیریت بهتر مواد زائد جامد.
- توسعه اقتصاد
- ایجاد شغل
- رسیدگی به بحران مدیریت پسماند

سایر فواید هضم بی هوازی:

- مواد اولیه مختلف در مقادیر مختلف و ترکیب موجود در محل می‌تواند برای هضم بی هوازی استفاده شود.
- هضم بی هوازی در هر مقیاسی، انعطاف پذیری دارد.
- بیوگاز تولید شده می‌تواند به طور انعطاف پذیر برای اهداف مختلف استفاده شود: به عنوان سوخت برای پخت و پز، تولید برق (Lee et al. 2020) و به عنوان سوخت حمل و نقل زمانی که به بیومتان تبدیل شود (Rogulska et al. 2018; Ardolino et al. 2021).
- محصولات و فرآورده‌های فرعی فرآیند هضم بی هوازی جریان‌های مختلفی را برای کسب درآمد ارائه می‌کنند.
- هضم بی هوازی نسبت به هضم هوازی مزایای مختلفی در انرژی مورد نیاز، تولید لجن، هزینه و تولید هضم پایدار علاوه بر تولید انرژی دارد (Shahid et al. 2020; Lee et al. 2019).

۵-۴ راکتورهای تولید بیوگاز

۵-۴-۱ راکتورهای بیوگاز معمولی

این دستگاه‌ها به گونه‌ای طراحی شده اند که تخریب زباله‌های آلی توسط مشارکت میکروب‌های بی هوازی برای تولید بیوگاز فراهم می‌شود. الزامات ایده آل برای یک راکتور بیوگاز عبارتند از:

- شدت گاز
- شدت آب
- محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش، گازهای خورنده و مواد شیمیایی
- عایق در برابر شرایط آب و هوایی شدید

انواع مختلف بیوراکتورهای معمولی هدف مشترکی برای تولید بیوگاز دارند. بیوراکتورهای مختلف، با این حال، در حالت‌های عملکرد، دمای عملیاتی، طراحی راکتور یا مواد مورد استفاده برای ساخت راکتورها و مقادیر جامد کل متفاوت هستند.

معمولاً برای ساخت بیوراکتور از فولاد، آجر، پلاستیک، بتن و فولاد ضد زنگ استفاده می‌شوند. برخی از راکتورهای بیوگاز معمولی عبارتند از (Patinvoh et al. 2017):

- **راکتورهای گنبدی ثابت:** این راکتور، یک محفظه نیمکره یا استوانه ای شکل است. و به طور دائم در زیر زمین قرار دارد. این راکتور از سیمان و آجر ساخته می‌شود. دریچه‌های ورودی و خروجی راکتور به ترتیب به مخازن اختلاط و سرریز متصل می‌شوند. سپس بیوگاز تولید شده در محفظه نگهدارنده گاز جمع آوری می‌شود. با افزایش فشار به دلیل تولید مداوم گاز، مواد هضم شده از طریق خروجی به مخزن سرریز خارج می‌شود. به دلیل طول عمر طولانی، این نوع بیوراکتورها عمدتاً در منازل روستایی استفاده می‌شوند.
- **راکتورهای گنبدی شناور:** مشابه راکتورهای گنبدی ثابت از نظر عملیاتی هستند. آنها دارای گنبد شناور برای جداسازی تولید و جمع‌آوری گاز هستند. برای ساخت از فولاد ملایم و برای ساخت کف و دیواره‌های راکتور از آجر استفاده می‌شود. این راکتور گاز را با فشار ثابت تامین می‌کند؛ و کار با آن آسان است.

۵-۴-۲ فن‌آوری‌های نوآورانه راکتور بیوگاز

اصلاحات اضافی می‌تواند سه مرحله اخیر کاملاً بیولوژیکی و مرتبط با تولید بیوگاز را بهبود بخشد. روشهای رایج برای این هدف عبارتند از (Postawa et al. 2021) (جدول ۵-۲):

جدول ۵-۲. نوع راکتور و هاضم برای هضم بی‌هوازی

۱	فن‌آوری‌های راکتور بیوگاز معمولی	الف) راکتور گنبدی ثابت ب) راکتور استوانه ای شناور
۲	فن‌آوری‌های نوآورانه راکتور بیوگاز	الف) هضم بی‌هوازی دو مرحله ای ب) هضم با فشار بالا به صورت خودکار
۳	برای تحلیل صنعت بیوگاز می‌توان از سه دسته کلی استفاده کرد	الف) هاضم کوچک ب) هاضم با اندازه متغیر ج) هاضم‌های با مقیاس متوسط تا بزرگ

هضم بی هوازی دو فازی^۱: این روش شامل جداسازی فاز در دماهای مختلف با کمک دو راکتور است. به همین دلیل این روش معمولاً هضم بی هوازی در فاز دما نامیده می‌شود. جداسازی دما یکی از رایج ترین روش‌های جداسازی فازها است (Sung and Santha 2003). دمای مخزن اول برای هیدرولیز نزدیک به ۶۵ درجه سانتیگراد است؛ اما مخزن پایین در دمای حدود ۳۵ درجه سانتیگراد نگهداری می‌شود (Pervin et al. 2013). pH داخل راکتورها معمولاً به مواد اولیه بستگی دارد؛ و در مرحله دوم خنثی می‌ماند (Lay et al. 1997).

هضم که در فشار بالا به طرز خودکار تولید شده^۲: یک روش دو مرحله ای است. این روش به جای دما به فشار بستگی دارد. در صورت تأخیر در جمع آوری سوخت، فشار به طور خودکار به دلیل تولید بیوگاز افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان فشار را تا ۲۰ بار افزایش داد. تغییر فشار به طور مستقیم بر قسمت‌های بیولوژیکی فرآیند و ترکیب نهایی بیوگاز تأثیر می‌گذارد. این امر ممکن است به این واقعیت نسبت داده شود که هیچ تغییر متناسب در ثابت قانون هنری برای متان و دی اکسید کربن با فشار، ۰/۰۱۶ مول/لیتر بر بار و ۰/۳۱۸ مول/لیتر بر بار وجود ندارد (Lindeboom et al. 2011; Wang et al. 2003). در نتیجه، حلالیت دی اکسید کربن با فشار سریعتر از متان افزایش می‌یابد؛ و منجر به افزایش غلظت متان در بیوگاز می‌شود. غلظت متان به ۹۰ درصد می‌رسد (Lindeboom et al. 2011). راکتور اول معمولاً در فشار بالا و راکتور دوم در فشار اتمسفر کار می‌کند، که در مرحله اول بازده بسیار خالص و حذف کلی اکسیژن مورد نیاز شیمیایی را ممکن می‌سازد.

۵-۵ توالی یابی ژن ۱۶ S rRNA میکروب‌های مرتبط با فرآیند برای هضم بی هوازی

در روش هضم بی‌هوازی، فعالیت و همزیستی میکروبی تحت تأثیر عوامل محیطی و جریان‌های مختلف پسماند قرار می‌گیرند. تأثیر همزیستی میکروبی در فرآیند هضم بی‌هوازی بر تولید بیوگاز به طور قابل توجهی مؤثر است. بنابراین، تحلیل و درک همزیستی میکروبی مرتبط با این فرآیند به یک مسئله مهم تبدیل می‌شود. با این حال، به دلیل ناکافی بودن داده‌های متابولیک در میکروب‌های مرتبط با فرآیند، اطلاعات بسیار محدودی در مورد همزیستی میکروبی در هضم مشترک بی‌هوازی وجود دارد. روش‌های مولکولی متداول قادر به فهم کامل توالی ژن ۱۶ S rRNA نمی‌باشند. به عبارت دیگر، این روش‌ها قادر به تشخیص

1. Two-phase anaerobic digestion
2. Autogenerated high-pressure digestion (AHPD)

تمامی جزئیات و بخش‌های مختلف توالی این ژن نیستند. اما توالی‌بندی ژن ۱۶ S rRNA یک روش کارآمد و مناسب برای جایگزینی روش‌های مولکولی سنتی است. این روش فنی قابلیت شناسایی و مقایسه میکروب‌ها در نمونه را دارد. همچنین به عنوان یک روش فنی شناخته شده برای تجزیه و تحلیل جوامع پیچیده میکروب‌ها یا محیط‌هایی که مطالعه آنها دشوار است، عمل می‌کند. جزئیات ناشناخته در مورد چگونگی واکنش میکروب‌ها به تقویت هاضم را می‌توان از روش اثر انگشت مبتنی بر ژن ۱۶ S rRNA به دست آورد (Rabii et al. 2019).

۵-۶ صنعت بیوگاز: وضعیت فعلی

علیرغم داشتن کاربردهای شناخته شده فناوری بیوگاز در سراسر جهان، صنعت بیوگاز هنوز به قابلیت کامل خود توسعه نیافته است؛ و در حال حاضر در مراحل اولیه توسعه است. طبق گزارش انجمن جهانی بیوگاز، از سه دسته کلی می‌توان برای تجزیه و تحلیل صنعت بیوگاز استفاده کرد:

۱. هاضم‌های کوچک: هاضم‌های کوچک بخشی جدایی ناپذیر از مدیریت زباله، امنیت انرژی و کشاورزی در مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه هستند. حدود ۵۰ میلیون هاضم‌های کوچک در سراسر جهان وجود دارد. از این تعداد، ۴۲ میلیون دستگاه در چین و ۴/۹ میلیون دستگاه در هند مشغول به کار هستند. در میان کشورهای آسیایی، چین ۸۴ درصد از این دستگاه‌ها را در اختیار دارد (Mohanty et al. 2021; Yang et al. 2019). بیوگاز تولید شده توسط هاضم‌های کوچک عمدتاً به عنوان سوخت پخت و پز در اجاق گاز استفاده می‌شود. ۵۰ میلیون اجاق گاز به طور کلی برای اهداف پخت و پز توسط حدود ۱۲۶ میلیون نفر استفاده می‌شود (۱۱۲ میلیون در چین و ده میلیون در هند).

۲. مقیاس هضم کننده: تولید برق از بیوگاز یک فناوری شناخته شده و پذیرفته شده در سراسر جهان است. یک موتور ترکیبی گرما و قدرت مرتبط با هر هضم کننده بی‌هوازی عملیاتی معمولاً برای تولید مقداری گرما استفاده می‌شود. تولید برق، گرما و سرمایش با توجه به نیاز نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. در سال ۲۰۱۵، چین تقریباً ۱۱۰۴۴۸ عدد سیستم مبتنی بر بیوگاز دارد که تعداد هاضم‌های بزرگ آنها ۶۹۷۲ است. ظرفیت نصب شده بر پایه بیوگاز در هند حدود ۳۰۰ مگاوات است.

۳. هاضم‌هایی با مقیاس متوسط تا بزرگ: تبدیل بیوگاز به بیومتان یک فناوری اثبات شده است. بیومتان می‌تواند به عنوان سوخت حمل و نقل استفاده شود؛ یا به شبکه‌های ملی یا محلی معرفی شود. بیوگاز توسط حدود ۷۰۰ گیاه در سراسر جهان به بیومتان تبدیل می‌شود.

۵-۷ توانایی هضم پسماند غذا

طبق گزارش انجمن جهانی بیوگاز:

- حدود ۱/۶ میلیارد تن غذا در سال هدر می‌رود که ۱/۳ میلیارد تن از آن قابل خوردن و ۰/۳ میلیارد تن غیر قابل خوردن است.
- اگر "همه مواد غذایی موجود" (۶۸/۵ درصد از زباله‌های غذایی که حداکثر برای هضم بی‌هوازی جذب می‌شوند) (زباله/اتلاف) از طریق هضم بی‌هوازی جمع‌آوری و بازیافت شود، می‌توان ۸۸۰ تا ۱۱۰۰ تراوات ساعت انرژی تولید کرد. سپس انرژی تولید شده می‌تواند برای برق و گرما استفاده شود. این انرژی می‌تواند نیاز ۱۱۲ تا ۱۳۵ میلیون نفر به برق را تامین کند.
- ۸۵ تا ۱۰۰ میلیارد متر مکعب بیومتان تبدیل شده از بیوگاز می‌تواند جایگزین مصرف گاز طبیعی در کشور آلمان شود.
- جمع‌آوری و بازیافت "همه موجودی" زباله‌های غذایی/اتلاف می‌تواند منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای معادل ۵۱۰ تا ۵۶۰ تن متریک دی اکسید کربن شود. این مقدار برابر با انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور بریتانیا است.
- باقی مانده هضم از نظر مواد مغذی غنی شده است؛ و می‌تواند به عنوان یک کود مناسب عمل کند.
- این کود آلی می‌تواند جایگزین ۱/۱ میلیون تن کلسیم، ۵/۰۳ میلیون تن نیتروژن، ۰/۱۳ میلیون تن منیزیم، ۱/۸ میلیون تن پتاس^۱، ۰/۵۸ میلیون تن گوگرد و ۰/۷۵ میلیون تن فسفات شود و کربن آلی را به خاک برگرداند.

۱. پتاس، گونه‌ای از نمک تولیدی یا معدنی است، که حاوی اکسید پتاسیم در فرم محلول در آب می‌باشد.

۵-۸ تولید بیوگاز - چشم انداز اقتصادی

هضم بی هوازی پسماندهای مرطوب برای تولید بیوگاز یک فناوری سودمند و شناخته شده است. هضم بی هوازی یک فناوری تبدیل زباله به انرژی است. این فناوری به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز تاکید دارد؛ زیرا مقدار پسماندها به طور نگران‌کننده‌ای افزایش می‌یابد؛ و سوخت‌های فسیلی تجدیدنپذیر تهدید قابل توجهی برای محیط زیست هستند. برای تعیین قابلیت اقتصادی فرآیند باید عوامل مختلفی در نظر گرفته شود (Bhatt and Tao 2020). برخی از عواملی که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از:

- هزینه‌های سرمایه گذاری مستقیم (مرتبط با راکتورهای بیوگاز).
- هزینه‌های سرمایه گذاری غیرمستقیم شامل هزینه لوله کشی اضافی است. این هزینه ها، می‌تواند تقریباً ۴/۵ درصد از محدودیت‌های برق داخلی و سایر هزینه‌ها باشد.
- سرمایه کاری (۵ درصد سرمایه گذاری ثابت)
- هزینه‌های عملیاتی شامل واردات برق، آب مورد نیاز برای فرآیند، گرما و مواد مغذی مثل آمونیاک است. این مواد به میکروب‌های هضم بی‌هوازی اضافه می‌شوند؛ تا این میکروب‌ها بتوانند از آنها استفاده کنند؛ و فرآیند هضم بی‌هوازی را انجام دهند.
- سایر هزینه‌های عملیاتی شامل نگهداری و بیمه اموال است. این هزینه‌ها به ترتیب ۳ درصد از هزینه‌های سرمایه برای گیاهان و ۰/۷ درصد از سرمایه گذاری ثابت را تشکیل می‌دهد.

۵-۸-۱ اقتصاد بیوگاز برای پسماند غذایی

از آنجایی که پسماند مواد غذایی می‌توانند منابع مختلفی داشته باشند، هزینه‌های زیادی را برای هضم بی هوازی نشان می‌دهند. پسماند غذایی ممکن است شامل مواد غذایی اضافی که پس از مصرف باقی می‌ماند؛ مواد غذایی که قبل یا بعد از آماده‌سازی غذا از بین می‌رود؛ و مواد غذایی که در طی فرآیندهای مختلف مانند تولید، خرده‌فروشی، توزیع و خدمات غذایی دور ریخته شده می‌شوند. پسماند مواد غذایی نیز تنوع زیادی در مقدار مواد جامد فرار و تبدیل آن به بیوگاز نشان می‌دهند (Bhatt and Tao 2020).

پیشرفت‌های فناوری منجر به افزایش مقادیر متان در بیوگاز می‌تواند هزینه‌های هضم بی هوازی را کاهش دهد؛ و آنها را برای گیاهان در مقیاس کوچک از نظر اقتصادی مناسب کند.

فناوری‌های جدید آماده سازی، از جمله روش‌های فنی بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی، برای افزایش شدت انرژی و بهره وری بیوگاز آزمایش شده‌اند (Zhang et al. 2016). هضم مشترک پسماند نیز از این نظر سودآور است؛ زیرا باعث تعادل مواد مغذی می‌شود؛ و اثرات منفی مواد مضر بر هضم را کاهش می‌دهد (Colantoni et al. 2017). بهینه سازی پارامترهای عملیاتی نیز به تثبیت سیستم و افزایش تولید بیوگاز کمک می‌کند.

۵-۸-۲ چرخه اقتصاد برای هضم بی هوازی پسماند غذایی

هضم پسماند غذایی نقش اساسی در چرخه اقتصاد دارد (Banks et al. 2018).

- هضم زباله‌های غذایی، مواد آلی و مواد مغذی موجود در زباله‌های آلی را به گردش در می‌آورد؛ و آنها را به طریقی هضم می‌کند که به عنوان کود زیستی در خاک عمل کند.
- هضم پسماندهای غذایی نیز با استفاده از پساب صنایع برای استخراج انرژی و استفاده بیشتر از آن برای تولید برق و گرما، پایداری و خودکفایی صنایع را بهبود می‌بخشد.

۵-۹ مسائل مربوط به تولید بیوگاز

جنبه‌های محدودیت‌های مختلفی در رابطه با تولید بیوگاز وجود دارد. برخی از مسائل مربوط به بیوگاز عبارتند از:

- بیوگاز حاوی مواد مضر و نامطلوبی است. این مواد مضر به عنوان آلاینده‌های بیوگاز مانند ترکیبات آلی فرار، سیلیسیم، هیدروژن سولفید، سیلوکسان، آمونیاک و مونواکسید کربن در نظر گرفته می‌شود. (Korbag et al. 2020).
- آمونیاک و هیدروژن سولفید، بسیار خورنده و سمی در نظر گرفته می‌شوند. این آلاینده‌ها از طریق انتشار گوگرد دی اکسید حاصل از احتراق به قطعات فلزی و واحد تولید همزمان (ترکیب حرارت و توان) آسیب می‌رسانند (Angelidaki et al. 2018; Abatzoglou and 2019; Boivin 2009; Tomassetti et al. 2019).
- سولفید هیدروژن انتشارات محیطی خطرناکی است. هیدروژن سولفید برای موتورهای ماشین‌آلات تصفیه بیوگاز، به عنوان یک عامل خورنده، آسیب وارد می‌کند.
- کمیت و کیفیت بیوگاز نیز تحت تأثیر هیدروژن سولفید قرار می‌گیرد؛ و استفاده از آنها را محدود می‌کند (Farghali et al. 2020; Lar and Xiujin 2009).

- متان آزاد شده در جو می‌تواند اثرات نامطلوب زیست محیطی ایجاد کند؛ و موجب انتشار گازهای گلخانه‌ای شود (Bhatt and Tao 2020).
- مدیریت نامناسب مشارکت میکروب‌های فعال در فرآیند هضم بی‌هوازی می‌تواند منجر به عملکرد نامناسب سیستم و تولید ناکارآمد بیوگاز شود (Mao et al. 2015).

۵-۱۰ چشم انداز آینده و نتیجه‌گیری

- افزایش تقاضا برای انرژی و اثرات نامطلوب زیست محیطی سوخت‌های فسیلی نیاز به منابع انرژی تجدید پذیر، پاک و سازگار با محیط زیست دارد. بیوگاز حاصل از پسماند آلی مختلف جایگزین بالقوه‌ای برای منابع انرژی تجدید ناپذیر است.
- انواع مختلفی از پسماند مواد غذایی نیز بسته به منبع و ترکیب وجود دارد. بیوگاز تولید شده از پسماند مواد غذایی هضم بی‌هوازی کاربردهای متعددی دارد. آنها می‌توانند برای تولید برق، به عنوان سوخت پخت و پز استفاده شوند، یا می‌توان آنها را به بیومتان تبدیل داد؛ و به عنوان سوخت حمل و نقل استفاده کرد.
- روش‌های فنی هضم مشترک بیشتر تمایل به افزایش بازده و کارایی سیستم‌های تولید بیوگاز دارند.
- تحقیقات و مطالعات گسترده باید برای طراحی راکتورهایی با فناوری‌های نوآورانه انجام شود؛ و این راکتورها باید تولید بیوگاز پیشرفته و موثر را گسترش دهند؛ و در عین حال از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشند.
- تبدیل بیوگاز به بیومتان تقریباً ۱۰۰ درصد بازدهی دارد. اما تبدیل بیوگاز به انرژی الکتریکی ۴۰ درصد راندمان دارد. (World Biogas Association report, Global Potential of Biogas 2019). فرآیند تبدیل متان، می‌تواند برای اهداف مختلف مانند تزریق به لوله‌های گاز یا به عنوان سوخت حمل و نقل استفاده شود. فرآیند تبدیل بیوگاز به بیومتان شامل حذف دی‌اکسید کربن و سایر آلاینده‌ها یا ناخالصی‌ها از بیوگاز است. این فرآیند منجر به افزایش مقادیر متان تا بیش از ۹۷ درصد می‌شود. فناوری غشایی با استفاده از روش فنی نفوذ گاز به عنوان روشی برتر برای جداسازی اکسیژن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن، متان و نیتروژن، به عنوان یکی از بهترین فناوری‌های پیشرفته در سال‌های اخیر شناخته شده است.

۵. پیشرفت‌های اخیر در تولید بیوگاز از پسماند مواد غذایی ۲۰۷

- بیش از ۵۰ درصد از تمام نیروگاه‌های ارتقاء دهنده در سطح جهان از فناوری‌های غشایی برای تبدیل بیوگاز به بیومتان استفاده می‌کنند.
 - اگرچه پسماند غذایی قابلیت زیادی برای تولید بیوگاز دارند، اما برای دستیابی به این قابلیت باید اقدامات خاصی اجرا و دنبال شود:
 - آگاهی در مورد اثرات مضر پسماند مواد غذایی و راه‌های پیشگیری از آنها باید افزایش یابد.
 - دولت‌های محلی باید تسهیلاتی را برای جمع‌آوری پسماند غذایی جداگانه در اختیار شهروندان قرار دهند.
 - کاهش گازهای گلخانه‌ای که در نتیجه هضم بی‌هوازی پسماند مواد غذایی حاصل می‌شود، باید مورد تایید و تشویق قرار گیرد.
 - مقررات و گواهینامه‌های برای خرید و فروش ایمن مواد هاضم و استفاده از این مواد باید اجرا شود.
 - در عصر شهرنشینی، زمانی که تقاضای انرژی به طور تصاعدی افزایش می‌یابد، تولید بیوگاز از پسماندهای تولید شده یک روش بسیار مؤثر برای مدیریت زباله است.
- تولید بیوگاز از پسماند مواد غذایی در حفاظت از محیط زیست، تولید مواد مغذی و روش‌های سازگار با محیط زیست بسیار سودمند است. با این حال، تحقیقات بیشتر در مورد جنبه‌های مختلف تولید بیوگاز از پسماند مواد غذایی باید برای افزایش کارایی فرآیند انجام شود.

منابع

- Abatzoglou N, Boivin S (2009) A review of biogas purification processes. *Biofuels Bioprod Biorefin* 3(1):42–71. <https://doi.org/10.1002/bbb.117>
- Abdelradi F (2018) Food waste behaviour at the household level: a conceptual framework. *Waste Manag* 71:485–493. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.001>
- Abiad MG, Meho LI (2018) Food loss and food waste research in the Arab world: a systematic review. *J Food Secur* 10:311–322. <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0782-7>
- Adebayo AO, Jekayinfa SO, Linke B (2015) Effects of organic loading rate on biogas yield in a continuously stirred tank reactor experiment at mesophilic temperature. *Curr J Appl Sci Technol* 11:1–9
- Adnan AI, Ong MY, Nomanbhay S, Chew KW, Show PL (2019) Technologies for Biogas Upgrading to biomethane: a review. *Bioengineering* 6(4):92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>

- Agarwal A, Singhmar A, Kulshrestha M, Mittal AK (2005) Municipal solid waste recycling and associated Markets in Delhi, India. *Resour Conserv Recycl* 44(1):73–90. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.09.007>
- Ali Shah F, Mahmood Q, Maroof Shah M, Pervez A, Ahmad AS (2014) Microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. *Sci World J* 2014:183752. <https://doi.org/10.1155/2014/183752>. Retraction in: *ScientificWorldJournal* 2017;2017:3852369
- Alqaralleh R, Kennedy K, Delatolla R, Sartaj M (2017) Biogas recovery from hyper-thermophilic anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge, organic fraction of municipal solid waste and fat, oil and grease. *J Bioremed Biodegr* 8:408. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000408>
- Angelidaki I, Treu L, Tsapekos P, Luo G, Campanaro S, Wenzel H et al (2018) Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. *Biotechnol Adv* 36(2):452–466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Ardolino F, Cardamone GF, Parrillo F, Arena U (2021) Biogas-to- Biomethane upgrading: a comparative review and assessment in a life cycle perspective. *Renew Sustain Energy Rev* 139:110588. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110588>
- Arenas CB, Meredith W, Snape CE, Gómez X, González JF, Martinez EJ (2020) Effect of char addition on anaerobic digestion of animal by-products: evaluating biogas production and process performance. *Environ Sci Pollut Res Int* 27(19):24387–24399. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08828-8>
- Banks CJ, Heaven S, Zhang Y, Baier U (2018) Food waste digestion: anaerobic digestion of food waste for a circular economy. In: Murphy JD (ed) *IEA bioenergy. Task 37*, p 12. ISBN: 978-1-910154-58-8 (eBook electronic edition), 978-1-910154-57-1 (printed paper edition)
- Barnes DF, Khandker SR, Samad HA (2011) Energy poverty in rural Bangladesh. *Energy Policy* 39(2):894–904. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.014>
- BETO (2017) Biofuels and bioproducts from wet and gaseous waste streams: challenges and opportunities. Bioenergy Technologies Office (BETO), Washington, DC
- Bhatt AH, Tao L (2020) Economic perspectives of biogas production via anaerobic digestion. *Bioengineering (Basel)* 7(3):74. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7030074>
- Capone R, Bilali HE, Debs P, Cardone G, Driouech N (2014) Food system sustainability and food security: connecting the dots. *J Food Secur* 2(1):13–22. <https://doi.org/10.12691/jfs-2-1-2>
- Capson-Tojo G, Rouez M, Crest M, Steyer J-P, Delgenès J-P, Escudié R (2016) Food waste valorization via anaerobic processes: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 15:499–547. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9405-y>
- Cecchi F, Cavinato C (2019) Smart approaches to food waste final disposal. *Int J Environ Res Public Health* 16(16):2860. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162860>
- Chaturvedi VK, Rai SN, NazishTabassum NY, Singh V, Bohara RA, Singh MP (2020) Rapid eco-friendly synthesis, characterization, and cytotoxic study of trimetallic stable nanomedicine: a potential material for biomedical applications. *Biochem Biophys Rep* 24:100812. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100812>
- Colantoni A, Carlini M, Mosconi E, Castellucci S, Villarini M (2017) An economical evaluation of anaerobic digestion plants fed with organic agro-industrial waste. *Energies* 10:1165. <https://doi.org/10.3390/en10081165>

- Dung TNB, Sen B, Chen CC, Kumar G, Lin C-U (2014) Food waste to bioenergy via anaerobic processes. *Energy Procedia* 61:307–312. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1113>
- Eskicioglu C, Prorot A, Marin J, Droste RL, Kennedy KJ (2008) Synergetic pretreatment of sewage sludge by microwave irradiation in presence of H₂O₂ for enhanced anaerobic digestion. *Water Res* 42(18):4674–4682. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.08.010>
- FAO (2013) Food wastage footprint. In: Impacts on natural resources; summary report. FAO, Rome. ISBN: 97892510775
- Farghali M, Andriamanohiarisoamanana FJ, Ahmed MM et al (2020) Prospects for biogas production and H₂S control from the anaerobic digestion of cattle manure: the influence of microscale waste iron powder and iron oxide nano particles. *Waste Manag* 101:141–149. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.003>
- Feki E, Battimelli A, Sayadi S, Dhouib A, Khoufi S (2020) High-rate anaerobic digestion of waste activated sludge by integration of electro-Fenton process. *Molecules* 25(3):626. <https://doi.org/10.3390/molecules25030626>
- Gomez X, Cuetos MJ, Cara J, Moran A, Garcia AI (2006) Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renew Energy* 31:2017–2024. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.029>
- Goswami R, Chattopadhyay P, Shome A, Banerjee SN, Chakraborty AK, Mathew AK, Chaudhury S (2016) An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: a step towards sustainable waste management. *3 Biotech* 6(1):7. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0395-9>
- Graham Z (2009) Peak people: the interrelationship between population growth and energy resources. *Energy Bulletin*, Leederville, Australia
- Gupta B, Arora SK (2016) Municipal solid waste Management in Delhi—the Capital of India. *IJIRSET* 5(4):5130–5138. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2016.0504106>
- Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, van Otterdijk R, Meybeck A (2011) Global food losses and food waste: extent, causes and prevention. Rome, FAO. ISBN: 9789251072059
- Hagos K, Zong J, Li D, Liu C, Lu X (2017) Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renew Sustain Energy Rev* 76:1485–1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>
- Harrad SH, Harrison RM (1996) The health effects of the products of waste combustion. Institute of Public and Environmental Health, University of Birmingham, Birmingham
- Hasan ASMM, Kabir MA, Hoq MT, Maria T, Johansson MT, Thollander P (2020) Drivers and barriers to the implementation of biogas technologies in Bangladesh. *Biofuels*:1–13. <https://doi.org/10.1080/17597269.2020.1841362>
- Ishangulyev R, Kim S, Lee SH (2019) Understanding food loss and waste- why are we losing and wasting food? *Foods* 8(8):297. <https://doi.org/10.3390/foods8080297>
- Kataki R et al (2017) Biohydrogen production scenario for Asian countries. In: Singh A, Rathore D (eds) *Biohydrogen production: sustainability of current technology and future perspective*. Springer, New Delhi, pp 207–235. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3577-4_10

- Katami T, Yasuhara A, Shibamoto T (2004) Formation of dioxins from incineration of foods found in domestic garbage. *Environ Sci Technol* 38(4):1062–1065. <https://doi.org/10.1021/es030606y>
- Khalid A, Arshad M, Anjum M, Mahmood T, Dawson L (2011) The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Manag* 31(8):1737–1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Kim HW, Han SK, Shin HS (2003 Dec) The optimization of food waste addition as a co-substrate in anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Manag Res* 21(6):515–526. <https://doi.org/10.1177/0734242X0302100604>
- Kleerebezem R, Joosse B, Rozendal R, Van Loosdrecht MCM (2015) Anaerobic digestion without biogas? *Rev Environ Sci Biotechnol* 14:787–801. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9374-6>
- Koberg M, Gedanken A (2012) Optimization of bio-diesel production from oils, cooking oils, microalgae, and castor and jatropha seeds: probing various heating sources and catalysts. *Energy Environ Sci* 5:7460–7469. <https://doi.org/10.1039/c2ee03530h>
- Korbag I, Omer SMS, Boghazala H, Abusasiyah MAA (2020) Recent advances of biogas production and future perspective. *IntechOpen*, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93231>
- Kumar S (2012) Biogas. *Intech*. www.intechopen.com/books/biogas. ISBN: 978-953-51-0204-5, Rijeka, Croatia. <https://doi.org/10.5772/1793>
- Kumar KN, Goel S (2009) Characterization of municipal solid waste (MSW) and a proposed mangement plan for Kharagpur, West Bengal, India. *Resour Conserv Recycl* 53(3):166–174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.004>
- Kumar S, Bhattacharyya JK, Vaidya AN, Chakrabarti T, Devotta S, Akolkar AB (2009) Assessment of the status of municipal solid waste management in metro cities, state capitals, class I cities, and class II towns in India: an insight. *Waste Manag* 29(2):883–895. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.011>
- Kumar P, Samuchiwal S, Malik A (2020) Anaerobic digestion of textile industries wastes for biogas production. *Biomass Convers Biorefin* 10:715–724. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00601-8>
- Lar JS, Xiujin LI (2009) Removal of H₂S during anaerobic bioconversion of dairy manure. *Chin J Chem Eng* 17:273–277. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60205-0](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60205-0)
- Lay J-J, Li Y-Y, Noike T (1997) Influences of ph and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Res* 31(6):1518–1524. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00413-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00413-7)
- Le TM, Vo PT, Do TA, Tran LT, Truong HT, Xuan Le TT, Chen YH, Chang CC, Chang CY, Tran QT et al (2019) Effect of assisted ultrasonication and ozone pretreatments on sludge characteristics and yield of biogas production. *PRO* 7:743. <https://doi.org/10.3390/pr7100743>
- Lee DH, Behera SK, Kim JW, Park HS (2009) Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study. *Waste Manag* 29(2):876–882. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.033>
- Lee E, Rout PR, Shin C, Bae J (2019) Effects of sodium hypochlorite concentration on the methanogenic activity in an anaerobic fluidized membrane bioreactor. *Sci Total Environ* 678: 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.396>

- Lee E, Rout PR, Kyun Y, Bae J (2020) Process optimization and energy analysis of vacuum degasifier systems for the simultaneous removal of dissolved methane and hydrogen sulfide from anaerobically treated wastewater. *Water Res* 182:115965. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115965>
- Lindeboom REF, Feroso FG, Weijma J, Zagt K, van Lier JB (2011) Autogenerative high pressure digestion: anaerobic digestion and biogas upgrading in a single step reactor system. *Water Sci Technol* 64(3):647. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.664>
- Lindeboom REF, Weijma J, van Lier JB (2012) High-calorific biogas production by selective CO₂ retention at autogenerated biogas pressures up to 20 bar. *Environ Sci Technol* 46(3):1895–1902. <https://doi.org/10.1021/es202633u>
- Lipinski B, Hanson C, Lomax J, Kitinaja L, Waite R, Searchinger T (2013) Reducing food loss and waste. In: Working paper. Installment 2 of creating a “sustainable food future”. World Resources Institute, Washington, DC
- Liu A, Ren F, Lin WY, Wang J-Y (2015) A review of municipal solid waste environmental standards with a focus on incinerator residues. *Int J Sustain Built Environ* 4:165–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.11.002>
- Lu C, Shen Y, Li C, Zhu N, Yuan H (2020) Redox-active biochar and conductive graphite stimulate methanogenic metabolism in anaerobic digestion of waste-activated sludge: beyond direct interspecies electron transfer. *ACS Sustain Chem Eng* 8:12626–12636. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04109>
- Lv W, Zhang W, Yu Z (2013) Evaluation of system performances and microbial communities of two temperature-phased anaerobic digestion systems treating dairy manure. *Bioresour Technol* 143:431–438. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.0136>
- Ma H, Wang Q, Qian D, Gong L, Zhang W (2008) The utilization of acid-tolerant bacteria on ethanol production from kitchen waste. *Renew Energy* 34(6):1466–1470. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.020>
- Mao C, Feng Y, Wang X, Ren G (2015) Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renew Sustain Energy Rev* 45:540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Martínez-Huitle CA, Ferro S (2006) Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes. *Chem Soc Rev* 35(12):1324–1340. <https://doi.org/10.1039/b517632h>
- Martinov M, Scarlat N, Djatkov D, Dallemand JF, Viskovic M, Zezelj B (2020) Assessing sustainable biogas potentials—case study for Serbia. *Biomass Convers Biorefin* 10:367–381. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00495-1>
- Mata-Alvarez J, Dosta J, Romero-Güiza MS, Fonoll X, Peces M, Astals S (2014) A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renew Sustain Energy Rev* 36:412–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Mateescu C, Dima A (2020) Critical analysis of key barriers and challenges to the growth of the biogas sector: a case study for Romania. *Biomass Convers Biorefin* 10(3):1–14. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01054-9>
- Mathew AK, Bhui I, Banerjee SN, Goswami R, Shome A, Chakraborty AK, Balachandran S, Chaudhury S (2015) Biogas production from locally available aquatic weeds of Santiniketan through anaerobic digestion. *Clean Technol Environ Policy* 17:1681–1688. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0877-6>

- Mazur A (1994) How does population growth contribute to rising energy consumption in America? *Popul Environ* 15:371–378. <https://doi.org/10.1007/BF02208318>
- Meiramkulova K, Bayanov A, Ivanova T, Havrland B, Kára J, Hanzlíková I (2018) Effect of different compositions on anaerobic co-digestion of cattle manure and agro-industrial by-products. *Agron Res* 16:176–187. <https://doi.org/10.15159/ar.18.008>
- Moestedt J, Westerholm M, Isaksson S, Schnürer A (2019) Inoculum source determines acetate and lactate production during anaerobic digestion of sewage sludge and food waste. *Bioengineering (Basel)* 7(1):3. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7010003>
- Mohanty A, Rout PR, Dubey B, Meena SS, Pal P, Goel M (2021) A critical review on biogas production from edible and non-edible oil cakes. *Biomass Convers Biorefin* 26:1–18. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01292-5>
- Mu L, Zhang L, Zhu K, Ma J, Ifran M, Li A (2020) Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: synergistic enhancement on process stability and biogas production. *Sci Total Environ* 704:135429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135429>
- Neumann P, Pesante S, Venegas M, Vidal G (2016) Developments in pre-treatment methods to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Rev Environ Sci Biotechnol* 15:173–211. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9396-8>
- Östergren K, Gustavsson J, Bos-Brouwers H, Timmermans T, Hansen OJ, Møller H, Anderson G, O'Connor C, Soethoudt H, Qusted T (2014) FUSIONS definitional framework for food waste. *EU Fusions*. ISBN: 978-91-7290-331-9
- Panpong K, Srisuwan G, O-Thong, S, Kongjan P. (2014) Anaerobic co-digestion of canned seafood wastewater with glycerol waste for enhanced biogas production. *Energy Procedia* 52:328–336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.084>
- Paritosh K, Kushwaha SK, Yadav M, Pareek N, Chawade A, Vivekanand V (2017) Food waste to energy: an overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling. *Biomed Res Int* 2017:19. <https://doi.org/10.1155/2017/2370927>
- Park J, Lee B, Tian D, Jun H (2018) Bioelectrochemical enhancement of methane production from highly concentrated food waste in a combined anaerobic digester and microbial electrolysis cell. *Bioresour Technol* 247:226–233. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.021>
- Parry M, Parry ML, Canziani O, Palutikof J, Van der Linden P, Hanson C (2007) Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC, vol 4. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN: 978-0-521-70597-4
- Patinvoh RJ, Arulappan JV, Johansson F, Taherzadeh MJ (2017) Biogas digesters: from plastics and bricks to textile bioreactor- a review. *J Energy Environ Sustain* 4:31–35. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00049-7)
- Pattnaik S, Reddy MV (2010) Assessment of municipal solid waste management in Pondicherry (Pondicherry), India. *Resour Conserv Recycl* 54(8):512–520. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.10.008>
- Pazos M, Alcántara MT, Cameselle C, Sanromán MA (2009) Evaluation of electrokinetic technique for industrial waste decontamination. *Sep Sci Technol* 44:2304–2321. <https://doi.org/10.1080/01496390902979867>

- Perea-Moreno M-A, Samerón-Manzano E, Perea-Moreno A-J (2019) Biomass as renewable energy: worldwide research trends. *Sustainability* 11:863. <https://doi.org/10.3390/su11030863>
- Pervin HM, Dennis PG, Lim HJ, Tyson GW, Batstone DJ, Bond PL (2013) Drivers of microbial community composition in mesophilic and thermophilic temperature-phased anaerobic digestion pre-treatment reactors. *Water Res* 47(19):7098–7108. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.0534>
- Postawa K, Szczygiel J, Kulazynski M (2021) Innovations in anaerobic digestion: a model-based study. *Biotechnol Biofuels* 14:19. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01864-z>
- Rabii A, Aldin S, Dahman Y, Elbeshbishy E (2019) A review on anaerobic co-digestion with a focus on the microbial populations and the effect of multi-stage digester configuration. *Energies* 12(6):1106. <https://doi.org/10.3390/en12061106>
- Ramos-Suarez JL, Ritter A, González JM, Pérez AC (2019) Biogas from animal manure: a sustainable energy opportunity in the Canary Islands. *Renew Sustain Energy Rev* 104:137–150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.025>
- Rekleitis G, Haralambous KJ, Loizidou M, Aravossis K (2020) Utilization of agricultural and livestock waste in anaerobic digestion (AD): applying the biorefinery concept in a circular economy. *Energies* 13:4428. <https://doi.org/10.3390/en13174428>
- Rogulska M, Bukrejewski P, Kraususka E (2018) Biomethane as transport fuel. *IntechOpen*, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75173>
- Rushton L (2003) Health hazards and waste management. *Br Med Bull* 68:183–197. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg034>
- Sevillano CA, Pesantes AA, Peña Carpio E, Martínez EJ, Gómez X (2021) Anaerobic digestion for producing renewable energy-the evolution of this Technology in a new Uncertain Scenario. *Entropy (Basel)* 23(2):145. <https://doi.org/10.3390/e23020145>
- Shah FA, Mahmood Q, Rashid N, Pervez A, Raja IA, Shah MM (2015) Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renew Sustain Energy Rev* 42:627–642. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053>
- Shah S, Lubeck E, Zhou W, Cai L (2017) seqFISH accurately detects transcripts in single cells and reveals robust spatial organization in the hippocampus. *Neuron* 94(4):752–758.e1. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.05.008>. PMID: 28521130
- Shahid MK, Kashif A, Rout PR, Aslam M, Fuwad A, Choi Y, Banu JR, Park JH, Kumar G (2020) A brief review of anaerobic membrane bioreactors emphasizing recent advancements, fouling issues and future perspectives. *J Environ Manage* 270:110909. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110909>
- Shibamoto T, Yasuhara A, Katami T (2007) Dioxin formation from waste incineration. In: Ware GW, Whitacre DM, Gunther FA (eds) *Reviews of environmental contamination and toxicology*, vol 190. Springer, New York, pp 1–41. https://doi.org/10.1007/978-0-387-36903-7_1
- Singh V, Mishra V (2020) Coronavirus disease, 2019, (COVID-19): current situation and therapeutic options. *Coronaviruses* 1:1–11
- Singh V, Singh MP, Verma V, Singh P, Srivastava R, Singh AK (2016) Characteristics of cold adapted enzyme and its comparison with mesophilic and thermophilic counterpart. *Cell Mol Biol* 62:144

- Singh AK, Singh V, Chaturvedi VK, Singh MP, Verma V (2017) Molecular techniques used for the study of soil bacterial diversity. In: *Incredible world of biotechnology*. Nova Science, New York. ISBN: 978-1-53611-097-5, pp 67–78
- Singh V, Yadav VK, Mishra V (2020a) Nanotechnology: an application in biofuel production. In: Srivastava M, Srivastava N, Mishra P, Gupta V (eds) *Nanomaterials in biofuels research. Clean energy production technologies*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9333-4_6
- Singh V, Yadav P, Mishra V (2020b) Recent advances on classification, properties, synthesis, and characterization of nanomaterials. In: Srivastava N, Srivastava M, Mishra P, Gupta VK (eds) *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications*. Wiley, Hoboken, NJ, pp 83–97
- Singh V, Singh N, Tabbasum N, Mishra V (2020c) Microbial system: an emerging application in the bioenergy production. In: Srivastava N, Srivastava M, Mishra P, Gupta VK (eds) *Microbial strategies for techno-economic biofuel production. Clean energy production technologies*. Springer, Singapore, pp 249–264. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7190-9_9
- Singh V, Singh MP, Mishra V (2020d) Bioremediation of toxic metal ions from coal washery effluent. *Desalin Water Treat* 197:300–318
- Singh N, Rai S, Singh V, Singh MP (2020e) Molecular characterization, pathogen-host interaction pathway and in silico approaches for vaccine design against COVID-19. *J Chem Neuroanat* 110: 101874. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2020.101874>
- Singh N, Singh V, Mishra D, Singh MP (2020f) An introduction of metagenomics and its application in microbial fuel production. In: Srivastava N, Srivastava M, Mishra P, Gupta VK (eds) *Microbial strategies for techno-economic biofuel production. Clean energy production technologies*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7190-9_10
- Singh V, Tiwari R, Chaturvedi VK, Singh N, Mishra V (2021a) Microbiological aspects of bioenergy production: recent update and future directions. In: Srivastava M, Srivastava N, Singh R (eds) *Bioenergy research: revisiting latest development. Clean energy production technologies*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4615-4_2
- Singh N, Singh V, Singh MP (2021b) Recent updates of biodiesel production: source, production methods, and metagenomic approach. In: Srivastava M, Srivastava N, Singh R (eds) *Bioenergy research: revisiting latest development. Clean energy production technologies*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4615-4_5
- Singh V, Singh J, Mishra V (2021c) Sorption kinetics of an eco-friendly and sustainable Cr (VI) ion scavenger in a batch reactor. *J Environ Chem Eng* 9:105125. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105125>
- Singh V, Singh J, Mishra V (2021d) Development of a cost-effective, recyclable and viable metal ion doped adsorbent for simultaneous adsorption and reduction of toxic Cr (VI) ions. *J Environ Chem Eng* 9:105124. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105124>
- Slonczewski JL, Foster JW (2014) *Microbiology: an evolving science*, 3rd edn. W. W. Norton, New York. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v15i1.711>
- Sosnowski P, Wieczorek A, Ledakowicz S (2003) Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Adv Environ Res* 7(3):609–616. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00049-7)

- Speece RE (1983) Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environ Sci Technol* 17(9):416A–427A. <https://doi.org/10.1021/es00115a725>
- Stern DI (2011) The role of energy in economic growth. *Ann N Y Acad Sci* 1219:26–51. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05921.x>
- Sung S, Santha H (2003) Performance of temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) system treating dairy cattle wastes. *Water Res* 37(7):1628–1636. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00498-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00498-0)
- Talyan V, Dahiya RP, Sreekrishnan TR (2008) State of municipal solid waste management in Delhi, the capital of India. *Waste Manag* 28(7):1276–1287. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.05.017>
- Tomassetti L, Segreto M, Torre M, Borin D, Tratzi P, Paolini V et al (2019) Environmental impacts of biogas in Europe. In: Biomass sustainability, impacts and policies; 27th European Biomass Conference and Exhibition; 27–30 May 2019, Lisbon, Portugal
- Tyagi VK, Lo SL (2011) Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: an up to date review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 10:215. <https://doi.org/10.1007/s11157-011-9244-9>
- Tyagi VK, Lo SL, Appels L, Dewil R (2014) Ultrasonic treatment of waste sludge: a review on mechanisms and applications. *Crit Rev Environ Sci Technol* 44:1220–1288. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763587>
- Wang L-K, Chen G-J, Han G-H, Guo X-Q, Guo T-M (2003) Experimental study on the solubility of natural gas components in water with or without hydrate inhibitor. *Fluid Phase Equilib* 207(1): 143–154. [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(03\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(03)00009-8)
- World Biogas Association Report, Global Potential of Biogas (2019). <https://www.worldbiogasassociation.org/global-potential-ofbiogas/>
- Xu Y, Dai X (2020) Integrating multi-state and multi-phase treatment for anaerobic sludge digestion to enhance recovery of bio-energy. *Sci Total Environ* 698:134196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134196>
- Yadav VK, Singh V, Mishra V (2019) Alkaline protease: a tool to manage solid waste and its utility in detergent industry. In: Tripathi V, Kumar P, Tripathi P, Kishore A, Kamle M (eds) *Microbial genomics in sustainable agroecosystems*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9860-6_14
- Yang Y, Ni J-Q, Zhu W, Xie G (2019) Life cycle assessment of large-scale compressed bio-natural gas production in China: a case study on manure co-digestion with corn Stover. *Energies* 12: 429. <https://doi.org/10.3390/en12030429>
- Yentekakis IV, Goula G (2017) Biogas management: advanced utilization for production of renewable energy and added-value chemicals. *Front Environ Sci* 5:7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00007>
- Zagozewski R, Judd-Henrey I, Nilson S, Bharadwaj L (2011) Perspectives on past and present waste disposal practices: a community-based participatory research project in three Saskatchewan first nations communities. *Environ Health Insights* 5:9–20. <https://doi.org/10.4137/EHI. S6974>

- Zhang Q, Hu J, Lee DJ (2016) Biogas from anaerobic digestion processes: research updates. *Renew Energy* 98:108–119. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>
- Zhao Q, Kugel G (1996) Thermophilic/mesophilic digestion of sewage sludge and organic wastes. *J Environ Sci Health A* 31:2211–2231. <https://doi.org/10.1080/10934529609376487>
- Zhen G, Lu X, Kato H, Zhao Y, Li YY (2017) Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: current advances, full-scale application and future perspectives. *Renew Sustain Energy Rev* 69:559–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.187>



بیوگاز از پسماند آشپزخانه

چکیده: تولید بیوگاز بهترین فناوری تجدیدپذیر است. این فناوری فرصتی برای تبدیل پسماندهای زیستی مختلف مانند پسماندهای کشاورزی، حیوانی، صنعتی و آشپزخانه به انرژی را دارد. توسعه بیوگاز فرصتی برای بهبود بهداشت و کاهش آلودگی هوا و گازهای گلخانه‌ای است.

تولید فعلی بیوگاز در کشور هند ۲/۰۷ میلیارد متر مکعب در سال است. این مقدار باید حدود ۲۹-۴۸ میلیارد متر مکعب در سال باشد.

فرآیند هضم بی‌هوازی به طور گسترده برای تصفیه پسماند آلی مختلف برای تبدیل به بیوگاز و کود زیستی استفاده شده است. همزیستی میکروبی پیچیده برای تجزیه ترکیبات آلی مختلف به محصولات نهایی مانند متان و دی‌اکسید کربن استفاده می‌شود. این فرآیند، به طور کلی به نام بیوگاز شناخته می‌شود. این موضوع در فصل کتاب فعلی بر اساس بازیافت، استفاده مجدد و کاهش به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. اکنون بیشتر مردم از سطوح زباله، طبق دستور دولت استفاده می‌کنند. کمپوست آلی بدون همزیستی میکروبی امکان پذیر نیست.

واژه‌های کلیدی: متان، بیوگاز، استات، گاز طبیعی فشرده زیستی

اختصارات

AD	هضم بی هوازی
BMP	قابلیت بیوشیمیایی متان
HVPD	تخلیه پالس ولتاژ بالا
McoDi	هضم مشترک مزوفیلی زباله‌های غذایی و کود
MDi	هاضم مزوفیلیک
OFMSW	بخشی از زباله‌های جامد شهری
TcoDi	هضم مشترک گرما دوست
VFA	اسید چرب فرار

۶-۱ مقدمه

پسماند مواد غذایی شامل غذای از قبل پخته شده و پوست سبزیجات، باقیمانده غذا پس از مصرف، تخلیه پسماند از صنایع تبدیلی مواد غذایی و رستوران‌ها و پسماند آشپزخانه است. سازمان غذا و کشاورزی تخمین می‌زند که پسماندهای غذایی تولید شده در سراسر جهان حدود ۱/۳ میلیارد تن است. این پسماند از منابع مختلف مانند سبزی فروشی، میوه فروشی، نانوائی، لبنیات و محصولات گوشتی تولید می‌شود. این زباله‌های غذایی در هوای آزاد تخریب می‌شوند؛ و باعث آلودگی می‌شوند؛ و عفونت‌های هوابرد^۱ را منتشر می‌کنند (Ananno et al. 2021). پیش‌بینی می‌شود در ۲۵ سال آینده، تولید زباله‌های غذایی به دلیل رشد زیاد جمعیت، عمدتاً در آسیا، تقریباً بیش از دو برابر افزایش یابد. بر اساس یک برآورد، ممکن است افزایش زباله از ۲۷۸ میلیون تن به ۴۱۶ میلیون تن از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ وجود داشته باشد. در کشور هند زباله‌های جامد تولید شده در سال حدود ۶۲ میلیون تن است؛ اما ۳۷۷ میلیون تن توسط جامعه شهری تولید می‌شود. هر ساله ۵۰ درصد از زباله‌های جامد تولید شده توسط جامعه شهری در کشور هند، پسماندهای غذایی است (Ghoshet al. 2018).

سوال اصلی این است که چگونه این پسماند مواد غذایی را مدیریت کنیم. در هند اساساً بخشی از فناوری زباله جامد شهری برای مدیریت پسماند مواد غذایی استفاده می‌شود. در این فناوری اساساً بخشی از زباله تولید شده جداسازی و آماده سازی می‌شود.

۱. عفونت‌هایی که از طریق هوا منتقل می‌شوند.

انتشار پسماند در کارخانه متاناسیون^۱ زیستی اتفاق می‌افتد. در این کارخانه، بیشتر پسماندهای آشپزخانه و پسماند مواد غذایی برای تولید بیومتان فشرده برای وسایل نقلیه در شهر تحت هضم بی‌هوازی قرار می‌گیرند (Shanmugam et al. 2019). اشاره شده است که به دلیل مدیریت نادرست این پسماندهای زیستی، از دست دادن مواد مغذی مفید برای گیاه وجود دارد؛ و تجزیه زیستی پسماند منجر به آزاد شدن فلزات مختلف و آلاینده‌های آن در آب می‌شود (Chandra Manna et al. 2018).

هضم پسماند مواد غذایی در شرایط بی‌هوازی پس از تصفیه مناسب پسماندهای آلی انجام می‌شود. این فرایند شامل خرد کردن پسماند به ذرات ریز و سپس تصفیه در مراحل مختلف برای تولید بیوگاز و کود می‌شود. بازده به شاخص کلیدی عملکرد بستگی دارد.

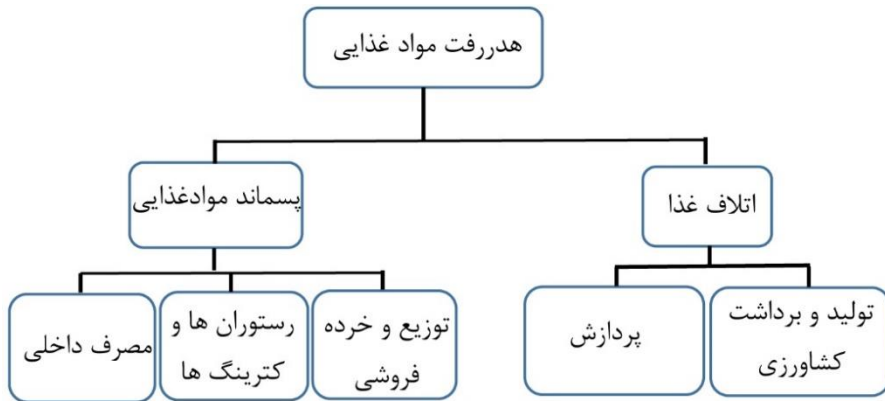
۶-۲ طبقه بندی سوخت‌های زیستی

همانطور که در شکل‌های ۶-۱، ۶-۲ و ۶-۳ ذکر شده است، بر اساس منبع غذایی، طبقه بندی برای سوخت زیستی به نسل اول، دوم و سوم قابل انجام است. بیواتانول و بیودیزل نمونه‌ای از سوخت زیستی نسل اول هستند. تولید اتانول از طریق زیست توده مانند زیست توده لیگنوسلولزی نمونه‌ای از سوخت زیستی نسل دوم است. و تولید بیواتانول از جلبک‌ها نمونه‌ای از سوخت زیستی نسل سوم است.

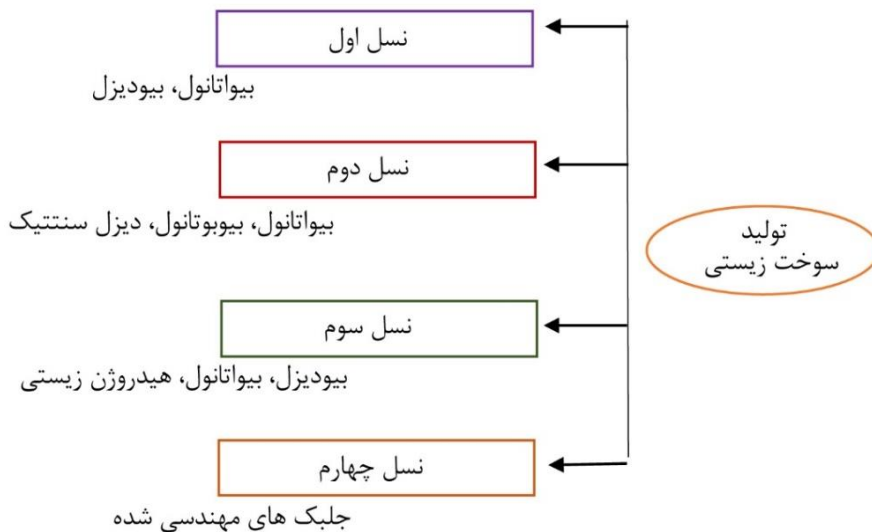


شکل ۶-۱. انواع مختلف زباله‌های آشپزخانه

۱. فرآیندی است که در آن گاز کربن دی‌اکسید و هیدروژن به متان تبدیل می‌شوند. این فرآیند معمولاً در شرایطی که نیاز به تبدیل گاز کربن دی‌اکسید به یک سوخت قابل استفاده و یا کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود داشته باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۶-۲. طبقه بندی زباله های مواد غذایی (ویرایش شده از Lytras et al. 2021)
(منبع: https://en.wikipedia.org/wiki/Food_loss_and_waste)



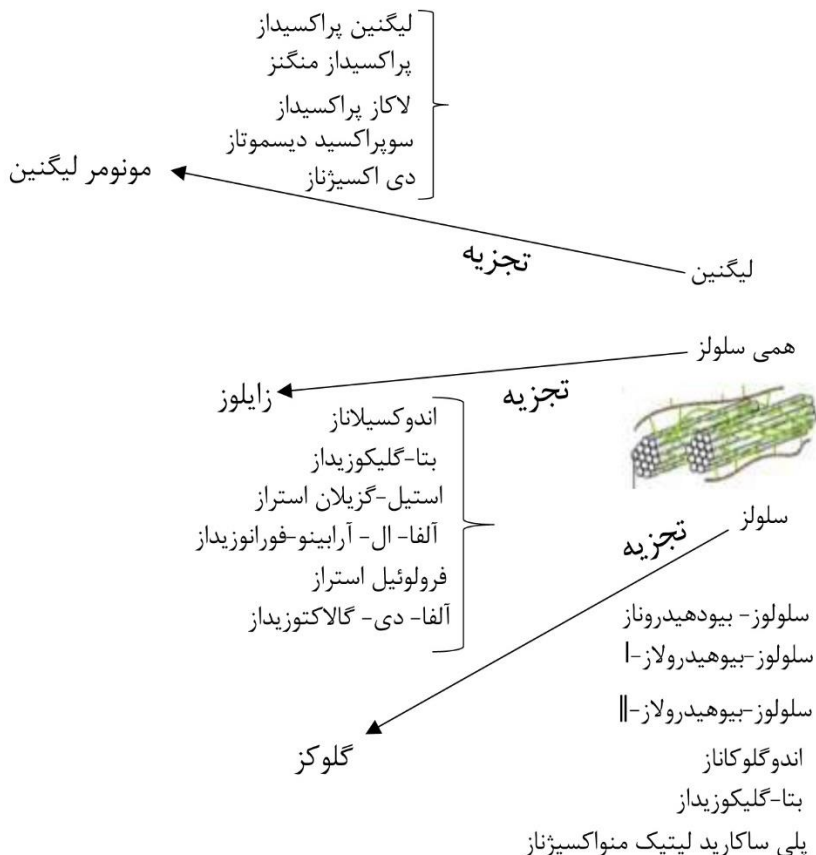
شکل ۶-۳. تولید سوخت زیستی
(منبع: https://en.wikipedia.org/wiki/Food_loss_and_waste)

پسماند غذایی مانند نشاسته و سبزیجات اغلب در زیرگروه نسل اول سوخت زیستی دسته بندی می شوند. تولید بیواتانول با پردازش زیستی مستقیم را می توان پس از هیدرولیز با استفاده از مخمر به عنوان میکروب انجام داد. به طور طبیعی، تولید بیوگاز از مواد آلی در شرایط بی هوازی صورت می گیرد. برای رشد میکروبها، نیاز به هاضم زیستی بی هوازی با طراحی مناسب و شرایط بهینه وجود دارد.

مدل سازی یکپارچه وضعیت بیوراکتور با مزیت دوگانه، به تولید بیوگاز و استخراج کود مفید می‌پردازد.

گازسازی و مخلوطی از گازهایی مانند هیدروژن و کربن مونواکسید: این روش برای تولید مخلوط گازی استفاده می‌شود. این مخلوط گازی، از ترکیب هیدروژن و کربن مونواکسید با نسبت‌های مختلف تشکیل شده است. در این روش، مواد آلی پس از احتراق اکسیژن را تجزیه می‌کند و مونواکسید کربن به تبدیل گاز کمک می‌کند.

آنزیم‌های سلولاز، لیگناز، همی سلولاز، پکتیناز آنزیم زایلانز مورد استفاده در اتانول لیگنوسلولزی نیز در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶. هیدرولیز لیگنوسلولز مراحل مختلف مشارکت آنزیمی (Champreda et al. 2019)

۶-۲-۱ ترکیب زباله‌های آشپزخانه

در بسیاری از بررسی‌ها، تجزیه و تحلیل ترکیب پسماند مواد غذایی، نشان می‌دهد که اجزای اصلی آن‌ها کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و چربی هستند. ترکیب متفاوت عبارتند از: (۱) ۸۰-۶۰ درصد رطوبت، (۲) ۵-۳ درصد خاکستر، (۳) ۶۰-۴۰ درصد کربوهیدرات، (۴) ۳۰-۱۸ درصد مواد فرار، (۵) ۳۰-۱۰ درصد پروتئین، (۶) ۴۰-۱۵ درصد چربی و (۷) ۶۵-۴۵ درصد کربن (Palaniveloo et al. 2020).

وعده‌های غذایی با پروتئین غنی شده از مقدار زیادی پروتئین تشکیل شده‌اند. وعده‌های غذایی گندم با رطوبت ۴ تا ۷ درصد، درصد بالایی از کربوهیدرات (حدود ۸۸ تا ۹۲ درصد) را دارا می‌باشند.

۶-۲-۱ قابلیت بیوشیمیایی متان

این روش فنی برای بررسی قابلیت تولید متان با تجزیه زیستی بی هوازی فاضلاب و زیست توده زباله استفاده می‌شود.

ماده آلی تجزیه شده و متان و کربن را آزاد می‌کند. به طور کلی، آزمون پتانسیل متان بیوشیمیایی برای ترکیبی از پسماند غذایی شامل برنج کته، پوست کلم و باقی مانده از گوشت پخته شده استفاده می‌شود. استفاده از سلولاز به عنوان یک کنترل در آزمون می‌تواند برای مقایسه نتایج تولید متان در حضور و عدم حضور این آنزیم مورد استفاده قرار گیرد (از آنجا که میزان تولید بیشتر متان ۴۷۲ میلی لیتر در گرم جامد فرار است و به ۸۶ درصد حجمی کاهش می‌یابد).

مطالعه دیگری بر روی پسماند رستوران‌ها، هنگامی که با کاه گندم در نسبت‌های مختلف مخلوط می‌شوند، به منظور افزایش تولید کل متان انجام شد. در نتیجه قابلیت بیوشیمیایی متان گزارش شده به ترتیب حدود ۰/۲۶ و ۰/۱۶ متر مکعب متان به ازای هر کیلوگرم جامدات فرار بود. نتایج نشان داد پسماند مواد غذایی به راحتی به عنوان جامدات قابل تجزیه زیستی تلقی می‌شوند، اما به دلیل وجود لیگنین، کاه با مشکلاتی در فرآیند تجزیه مواجه است.

چهار مرحله در تولید بیوگاز مانند (۱) هیدرولیز آنزیمی، (۲) تولید اسید، (۳) تولید استات، و (۴) در نهایت تولید متان، مشارکت می‌کنند.

مراحل تولید متان و تولید بیوگاز:

۱- هیدرولیز: این میکروب‌ها انواع مختلفی از آنزیم‌ها را ترشح می‌کنند. این آنزیم‌ها مواد غذایی پیچیده را به مونومر خود مانند اسیدهای چرب گلوکز و اسیدهای آمینه هیدرولیز می‌کنند.

۲- سپس مونومر هایی مانند گلوکز، اسیدهای چرب و آمینواسیدها توسط باکتری‌های استوژنیک تولید کننده هیدروژن، به اسیدهای چرب فرار بالاتر مانند اسید پروپیونیک و اسید بوتیریک تبدیل می‌شوند. این فرآیند همچنین منجر به تولید هیدروژن، دی اکسید کربن و اسید استیک می‌شود.

۳- در نهایت، باکتری‌های تولید کننده متان، تمام استات و سایر محصولات را به متان و دی اکسید کربن تبدیل می‌کنند.

الف) زباله‌های آشپزخانه ابتدا جمع آوری شد.

ب) زباله‌های خرد شده به ذرات ریز تبدیل شد.

پ) ذرات ریز تجزیه می‌شوند.

ت) فرآیند تولید اسید، پیش نیازهای هیدرولیز شده را به اسید تبدیل می‌کند. این پیش نیازهای هیدرولیز شده توسط میکروب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ سپس این اسید به استات تبدیل می‌شود. استات به عنوان پیش نیاز برای تولید متان و دی اکسید کربن استفاده می‌شود.

ج) آنزیم‌های هیدرولیتیک (لیپازها، پروتئازها، سلولازها، آمیلازها) برای تبدیل مواد زائد به انواع مختلفی از اسیدها که در حال تبدیل به اسید استیک هستند، آزاد می‌شوند.

چ) آنزیم لیپاز، چربیها را به اسیدهای چرب با زنجیره بلند تبدیل می‌کنند. باکتری‌های کلوستریدی و میکروکوکسی به دلیل تولید آنزیم لیپاز خارج سلولی (تولید در خارج سلول میکروارگانیسم) شناخته شده اند. اسیدهای چرب با زنجیره بلند تولید شده توسط اکسیداسیون p تجزیه می‌شوند تا استیل CoA تولید شود.

ح) پروتئین‌ها به طور کلی توسط آنزیم پروتئازها به اسیدهای آمینه تجزیه می‌شوند. این

آنزیم‌ها توسط میکروب‌های مختلفی مانند *کلستریدیوم*، *بakterioides*، *بوتیریوبیریو*، *فوزوباکتریوم*، *استرپتوکوکوس* و *سلنوموناس* ترشح می‌شوند. اسیدهای آمینه تولید شده سپس به اسیدهای چرب مانند استات، پروپیونات، بوتیرات و آمونیاک تجزیه می‌شوند. این اسیدها در *کلستریدیوم*، *پیتوکوک*، *سلنوموناس*، *کمپیلوباکتر* و *بakterioides* یافت می‌شود.

خ) پلی ساکاریدهایی مانند سلولز، نشاسته و پکتین موجود در پسماندهای آشپزخانه توسط آنزیم ترشح شده مانند سلولازها، آمیلازها و پکتیناز هیدرولیز می‌شوند. اکثر سلولازهای میکروبی برای تولید گلوکز هیدرولیز می‌شوند. در حالی که نشاسته خام موجود در پسماند غذایی با فعالیت فرآیند آمیلولیتیک^۱ در آنزیم آمیلاز به گلوکز تبدیل می‌شود. پنج نوع از آنزیم آمیلاز باید فعال باشند. این آنزیم‌ها شامل (الف) α -آمیلاز (پیوند ۱-۴ را می‌شکند)، (ب) β -آمیلاز (پیوند ۱-۴ را می‌شکند)، (ج) آمیلوگلیکوزیداز (پیوند ۱-۴ و ۱-۶ را می‌شکند)، (د) آنزیم شاخه شکن (پیوند ۱-۶ را می‌شکند)، و (ه) مالتاز که روی گلوکز آزاد کننده مالتوز و اکشن می‌دهد. پکتین‌ها توسط آنزیم پکتینازها تجزیه می‌شوند، در حالی که آنزیم زایلان‌ها برای تولید زایلوز تجزیه می‌شوند.

میکروب‌های مورد نیاز برای هیدرولیز:

شناخت میکروب برای هیدرولیز پسماند مواد غذایی، ضروری است. پنج نوع پسماند غذایی وجود دارد که در هاضم بی هوازی برای تولید بیوگاز مورد بررسی قرار گرفت (Chen et al. 2010). پسماند استفاده شده از کارخانه فرآوری سوپ و پسماندهای آشپزخانه پرورش ماهی تحت آنالیز تجربی قرار گرفتند. هضم بی هوازی عمدتاً ۶۰ درصد متان و ۴۰ درصد دی اکسید کربن تولید می‌کند؛ و گزارش شده است که تشکیل متان با استفاده از میکروب‌های گرمادوست مانند میکروب‌های استوژنیک *ستروفاسیتیکوس* شینکی^۲ که استات و متان را آزاد می‌کنند، مناسب است؛ اما نیاز به باکتری‌های تولیدکننده متان هیدروژنوتروف^۳ دارد. انواع باکتری‌های گرمادوست آزمایش شده در تولید بیوگاز شامل باکتری *ستروفاسیتیکوس*^۴ (بازده ۳۸/۲۴

۱. فرآیند آمیلولیتیک یا آمیلولیز تبدیل نشاسته به قند توسط اسیدها یا آنزیم‌هایی مانند آمیلاز است.

۲. این میکروب‌های استوژنیک، شیمیوتروف هوازی اختیاری هستند و قادر به استفاده از هیدروژن و دی اکسید کربن برای تولید استات (اسید استیک) هستند.

۳. اصطلاح "هیدروژنوتروف" به میکروب‌هایی اشاره دارد که برای رشد و تغذیه خود به هیدروژن به عنوان منبع انرژی و الکترون نیاز دارند.

درصد)، گلریا^۱ (بازده ۲۳/۵۳ درصد)، ترموگیمنوموناس^۲ و... می باشد (Kushkevych et al. 2020) (جدول ۱-۶ و ۲-۶).

جدول ۱-۶. میکروبها و واکنش و محصول آنها (Krzysztof Ziemiński 2012)

نوع راکتور	میکروارگانیزم	گونه های فعال	محصول
تخمیر	باکتری های هیدرولیتیک ^۳	باکترئیدها، لاکتوباسیلوس، پروپیونی باکتریوم، اسفنگوموناس، اسپوروباکتریوم، مگاسفارا، بیفیدوباکتریوم.	قندهای ساده، پپتیدها، اسیدها چرب
ارگانیزم های تولید کننده اسید	باکتری های سینتروپیک ^۴	رومینوکوک، پنی باسیلوس، کلستریدیوم.	اسیدهای چرب فرار
ارگانیزم های تولید کننده استات	باکتری های تولیدکننده استات	دسولفوویبریو، آمینوباکتریوم، اسیدآمینوکوک.	CH ₃ COOH
ارگانیزم های تولید کننده متان	باکتری های تولیدکننده متان	متانوساتا، متانولوبوس، متانوکوکویدها، متانوهالوفیلوس، متانوسالسوس، متانوهالوبیوم، هالومتانوکوکوس، متانولاسینییا، متانوژنیوم، متانوکوکوس.	CH ₄

جدول ۲-۶. نسبت C/N در پسماند مختلف

ماده	درصد نیتروژن	نسبت کربن به نیتروژن
ادرار حیوانات	۱۵-۲۰	۱
ساقه های پنبه	۱/۷	۳۰
گاو، کودگاو وحشی	۱/۴-۳	۱۵-۴۰
کاه جو دوسر، کاه کتان	۱-۱/۲	۵۰-۶۰
کاه گندم و برنج	۰/۳-۰/۵	۱۲۰-۱۵۰
خاک اره	۰/۱-۰/۲۵	۲۰۰-۵۰۰

1. Gelria

2. Thermogymnomonas

۳. باکتری هایی هستند که قادر به تجزیه مواد غذایی و دیگر مواد آلی توسط فرایند هیدرولیز هستند. در این فرایند، باکتری ها انزیم ها را ترشح می کنند که باعث تجزیه و تفکیک مولکول های آلی در محیط می شوند.

۴. مجموعه ای از باکتری هایی هستند که در فرایندهای سینتروپیک شرکت می کنند. سینتروپی یک مفهوم در علوم زیستی است که به تعامل مثبتی بین گونه های میکروبی در یک محیط اشاره دارد. در این تعامل، باکتری ها باعث افزایش بهره وری و عملکرد بهتر محیط زیستی می شوند.

باکتری‌های/استرپتوکوک و/اتروباکتر جنس اصلی میکروب‌های بی‌هوازی هستند. این میکروب‌ها مسئول هیدرولیز آنزیمی و تخریب، به خصوص برای تجزیه پلی‌ساکارید به مونومر، در شرایط بهینه می‌باشند.

انواع محصول هیدرولیتیک شامل استات، بوتیرات، پروپیونات و والرات (محصولات اسید چرب فرار)، همراه با ایزوبوتیرات، مقداری دی‌اکسید کربن، آمونیاک و هیدروژن می‌باشند.

در شرایط بی‌هوازی، بی‌هوازی‌های اختیاری برای تولید متان به مقداری اکسیژن و کربن نیاز دارند. پیش‌نیازهای اصلی مورد استفاده برای تولید متان استات، کربن و هیدروژن هستند.

یک مطالعه توسط هضم مشترک پسماندهای آشپزخانه/پسماندهای غذایی با مخلوط کردن مدفوع گاو/کود در طول تولید متانوژن انجام شد (Zamanzadeh et al. 2017).

در هاضم با دمای متوسط، بیشترین بازده متان (۴۸۰ میلی‌لیتر بر گرم جامدات فرار) زمانی مشاهده شد که تنها با پسماند غذایی تغذیه می‌شد. در حالی که هضم کود، متان بیشتری (۲۶ درصد) تولید کرد. این کود شامل ترکیب کود و پسماند غذایی بود. اسید چرب فرار اصلی در سیستم‌های با دمای متوسط، استات بود. این استات به ترتیب ۹۳ و ۱۷۲ میلی‌گرم در لیتر بود. اسیدهای چرب فرار اصلی موجود در هاضم عمدتاً استات و پروپیونات بودند. باکتری‌های مهم گزارش شده در هاضم‌ها از دسته‌ی فیرمیکوت‌ها^۱، ترموتوگنا^۲ و سینرژی^۳ بودند؛ با این حال، فراوانی نسبی این دسته‌های باکتری متفاوت بود (جدول ۶-۱ و ۶-۲ را ببینید).

تولید کننده متان:

پیش‌نیاز برای تولید متان عمدتاً از استات، هیدروژن و دی‌اکسید کربن استفاده می‌کند؛ اما اسیدهای چرب فرار مانند والرات، پروپیونات، بوتیرات و ایزوبوتیرات مرتبط‌ترین هستند. و بیشتر توسط باکتری‌های استوژنیک برای تبدیل آنها به استات و هیدروژن استفاده می‌شود. بیشتر استات در محیط موجود است. استات در نهایت کاهش یافته و به متان تبدیل می‌شود.

۱. دسته‌ای از باکتری‌ها هستند که اکثر آنها ساختار دیواره سلولی گرم مثبت دارند.

۲. دسته‌ای از باکتری‌ها هستند که گرم منفی، بی‌هوازی و عمدتاً گرمادوست هستند.

۳. دسته‌ای از باکتری‌ها که با هم تعامل یا مشارکت دارند.

تولید متان نیز تحت تأثیر نسبت کربن به نیتروژن است؛ و باید بیش از ۱۹/۶ باشد (جدول ۶-۲). استفاده از میکروب‌های گرمادوست نسبت به میکروب‌هایی که در دمای متوسط مقاومت می‌کنند، سودمندتر هستند؛ زیرا دما عمده‌تاً از سطح بهینه فراتر میرود. بنابراین ارگانیسم‌های تولیدکننده متان دو نوع هستند: (الف) ارگانیسم‌های تولیدکننده متان استوکلاستیک (که اساساً متان را از اسید استیک تولید می‌کنند) و (ب) ارگانیسم‌های تولیدکننده متان هیدروژنوتروف (هیدروژن برای کاهش دی اکسید کربن استفاده می‌شود) (شکل ۶-۵).



شکل ۶-۵. نمودار جریان در تولید بیوگاز را نشان می‌دهد. برای تولید بیوگاز با غلظت متان بالای ۷۰ درصد، ضروری است که هر مرحله را به ترتیب دنبال کنید؛ زیرا تمام مراحل با یکدیگر ارتباط دارند. محصول یک مرحله، پیش نیاز برای مراحل بعدی است (Paritosh et al. 2017).

ارگانیسم‌های تولیدکننده متان از دی اکسید کربن به عنوان گیرنده نهایی الکترون برای تبدیل سایر پیش نیازها به متان استفاده می‌کند. در نتیجه ارگانیسم‌های تولیدکننده متان عمده‌تاً در چنین زیستگاه‌هایی که گیرنده‌های الکترون مانند O_2 ، NO_3^{-1} ، Fe^{+3} و SO_4^{-2} وجود دارند، رشد می‌کنند و یافت می‌شوند (Berghuis et al. 2019; Kato and Igarashi 2019).

پسماندهای آشپزخانه باید به ترکیبات ساده‌تر (هیدروژن، دی اکسید کربن و استات) تجزیه شوند. این ترکیبات ساده به ترکیبات حاوی اتیل تبدیل می‌شوند. این ترکیبات حاوی اتیل می‌توانند به عنوان منابع تغذیه برای بیشتر ارگانیسم‌های تولید کننده متان عمل کنند. در نتیجه متان تولید می‌شود.

طبقه‌بندی ارگانیسم‌های تولید کننده متان بر اساس پیش نیاز آنها:

۱. هیدروژنوتروفیک
۲. استیکلاستیک
۳. متیلوتروفیک

ارگانیسم‌های تولید کننده متان هیدروژنوتروفیک، دی اکسید کربن را به متان کاهش می‌دهند. ارگانیسم‌های تولید کننده متان هیدروژنوتروفیک در رسوبات عمیق دریایی، روده‌های عقب موریانه و دستگاه گوارش انسان و حیوان یافت شدند. ارگانیسم‌های تولید کننده متان هیدروژنوتروفیک به طور کلی یک سوم انتشار متان تولید شده از نظر بیولوژیکی را تشکیل می‌دهند. حدود ۱/۵ میلیارد گاو روی زمین وجود دارد. یک گاو روزانه حدود ۲۰۰ لیتر متان آزاد می‌کند. بنابراین مجموع متان حدود ۳۰۰ میلیارد لیتر در روز یا ۷۲ تریلیون گرم در سال آزاد می‌شود (Zhuang et al. 2018).

ارگانیسم‌های تولید کننده متان استیکلاستیک، استات را به متان و دی اکسید کربن تبدیل می‌کنند. ارگانیسم‌های تولید کننده متان هیدروژنوتروف ظرفیت کاهش هیدروژن را دارند؛ تا محیطی مساعد برای تشکیل استات ایجاد کنند. ارگانیسم‌های تولید کننده متان استیکلاستیک، بیشتر در هاضم‌های بی هوازی یافت می‌شوند. ارگانیسم‌های تولید کننده متان استیکلاستیک نقش مهمی در تولید متان دارند. در مسیر استیکلاستیک، تشکیل استیل کوآنزیم منجر به اکسیداسیون استات و دی اکسید کربن با استفاده از فرودوکسین به عنوان گیرنده الکترون انجام می‌شود.

در یک هاضم بی هوازی، مشارکتی از میکروارگانیسم‌ها وجود دارند. این ارگانیسم‌ها در تجزیه زباله‌های آلی به بیوگاز نقش دارند. متابولیسم هگزوز در اکثر باکتری‌های بی‌هوازی، از طریق مسیر گلیکولیتیک^۱ انجام می‌شود. در این مسیر، هگزوزها و پنتوزها به ترکیبات واسطه با دو

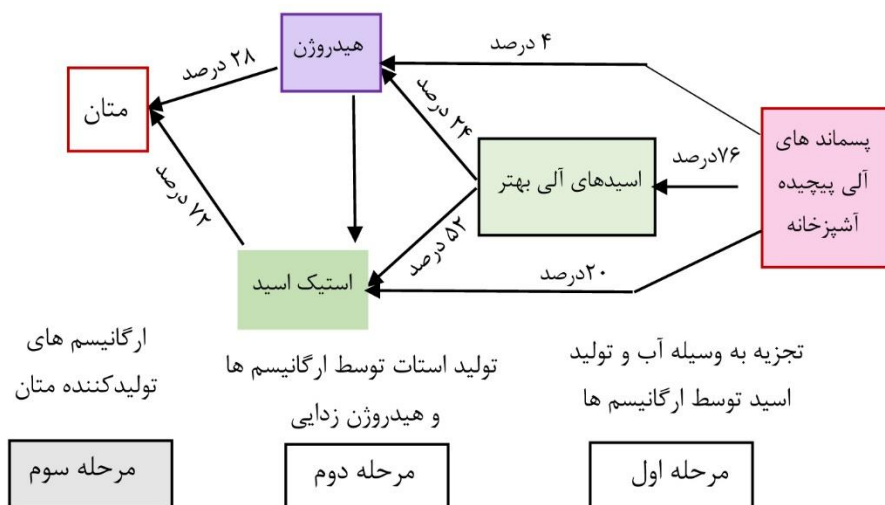
۱. مسیر گلیکولیتیک یا مسیر Embden-Meyerhof-Parnas نیز شناخته می‌شود یک توالی از ۱۰ واکنش شیمیایی است که در اکثر سلول‌ها انجام شده و یک مولکول گلوکز را به دو مولکول پیرووات (پیروویک اسید) تجزیه می‌کند.

کربن (C2) و سه کربن (C3) تبدیل می‌شوند. (با کاهش حامل‌های الکترون (مانند NADH) پیرووات را با NADH تولید می‌کنند. پیرووات و NADH به لاکتات، پروپیونات، استات و اتانول تبدیل می‌شوند.

در شکل ۶-۶ تجزیه اسید چرب فرار ذکر شده است. ایت اسید چرب فرار، به استات و هیدروژن تجزیه می‌شود (اسید چرب فرار یک اسید چرب با زنجیره بلند است؛ و اسید چرب فرار به ترتیب توسط استوژن و کلسترییدیوم فرمیکوآستیکوم به استات و هیدروژن تبدیل می‌شود).

۶-۲-۱-۲ روشهای آماده سازی برای پسماند مواد غذایی

برای افزایش آماده سازی پسماند غذایی، قبل از هیدرولیز واقعی، باید ابتدا آن‌ها پیش تصفیه شوند. انواع مختلفی از فناوری‌های آماده سازی موجود است؛ اما کاربرد آنها بر اساس نوع پسماند مواد غذایی تعیین می‌شود. انواع مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و بیولوژیکی آماده سازی وجود دارد؛ و می‌توان از روش حرارتی فقط در دماهای پایین (کمتر از ۱۲۰ درجه سانتیگراد) استفاده کرد. نتیجه بدست آمده $647/5 \pm 10/6$ میلی لیتر متان به ازای هر گرم جامدات فرار بود. این مقدار متان با استفاده از آماده سازی حرارتی در ۸۰ درجه سانتیگراد برای ۱/۵ ساعت بود.



آماده سازی‌های شیمیایی شامل PH اسیدی، منجر به افزایش آمونیاک و تجمع اسیدهای چرب فرار می‌شود. پسماند لبنیات، پسماند آبجوسازی و پسماند دام عمدتاً برای تولید آمونیاک مناسب هستند (Meena et al. 2020). با استفاده از پیش‌پردازش پسماند غذایی با استفاده از مایکروویو (با سرعتی معادل ۷/۸ درجه سانتی‌گراد در دقیقه)، منجر به تولید بیوگاز با ۲۴ درصد افزایش اکسیژن مورد نیاز شیمیایی محلول شد (Paritosh et al. 2017).

تعیین ارزش مواد مغذی در پسماند غذایی در برخی موارد توصیه شده است (Lytras et al. 2021). تعیین ارزش مواد مغذی در پسماند غذایی دارای مزایایی است. مواد مغذی در پسماند غذایی متان تقریباً خالص تولید می‌کند و تمام اجزای سمی دیگر را جدا می‌کند. بیشترین پسماند مواد غذایی از منازل تولید می‌شود؛ اما پسماند مواد غذایی خانگی برای خوراک دام استفاده نمی‌شود. این به دلیل عدم اطمینان بیشتر در مورد کنترل‌های فرآیند اضافی مورد نیاز برای کاهش خطرات و رعایت استانداردهای قابل قبول ایمنی خوراک و کیفیت است.

برخی از محققین بر روی بهینه سازی تولید هیدروژن از طریق مسیر متان از روغن پسماند بررسی کردند (Rafieenia et al. 2019). پسماند مواد غذایی آلی غیرقابل تخریب و مقاوم با مخلوط قارچی با هیدرولیز طولانی مدت برای تولید متان از قبل تصفیه شدند (Ma et al. 2018). آماده سازی تخلیه پالس ولتاژ بالا، فناوری جدیدی برای افزایش تولید متان است؛ و با موفقیت توانست تولید را تا ۱۶۰ درصد افزایش دهد (Zou et al. 2016).

۶-۲-۲ هاضم بیوگاز

هاضم بیوگاز یک هضم بی هوازی است. این هاضم برای هضم پسماند مختلف آشپزخانه و سایر پسماندها استفاده می‌شود. هضم کننده‌های بیوگاز را می‌توان به چند دسته طبقه بندی کرد: (۱) سیستم‌های غیرفعال (کنترل کم فرآیند هضم بی هوازی)، (۲) سیستم هایی با سرعت پایین و (۳) سیستم هایی با سرعت بالا (باکتری‌های تولیدکننده متان در هضم کننده به دام افتاده اند؛ تا کارایی تولید بیوگاز را افزایش دهند) (Alkhalidi et al. 2019).

سیستم‌های بیوگاز کوچک (هضم کننده زیستی قابل حمل) اغلب با ظرفیت حجمی کوچک از ۱ تا ۱۰ متر مکعب استفاده می‌شود. سیستم‌های بیوگاز کوچک، از پسماند آشپزخانه به عنوان ماده غذایی استفاده می‌کنند؛ و بیوگاز و گِل روان زیستی (که به عنوان کود آلی تبدیل می‌شود) تولید می‌کنند. به طور معمول، نیروگاه‌های بیوگاز در مقیاس صنعتی ظرفیت بیشتری برای

تولید بیوگاز در بازه ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر مکعب در روز دارند. این نوع بیوگاز با ظرفیت بزرگتر به طور عمده از پسماند آلی شهری یا صنعتی استفاده می‌کند؛ تا بیوگاز تولید شود.

بیوگاز به عنوان سوخت پخت و پز استفاده می‌شود؛ و بیشتر با استفاده از پوست میوه‌های شور تولید می‌شود؛ تا بتواند به درستی در مقیاس بزرگ استفاده شود.

در هند، نوع مواد اولیه به طور کلی متغیر است، بنابراین هر بار نوع هضم‌کننده باید تغییر کند (He et al. 2021; Song et al. 2014a, b).

۶-۲-۳ موانع در تولید بیوگاز

موارد زیر موانع تولید تجاری بیوگاز هستند (Mittal et al. 2018):

۱. هزینه بالای نصب
 ۲. عدم حمایت مالی
 ۳. تغییراتی در تامین مواد اولیه وجود دارد که ممکن است بر زنجیره تامین تاثیر بگذارد.
- اگر واقعاً کسی بخواهد این کار را در درازمدت در هند انجام دهد، سودآوری کارخانه به عوامل مختلفی بستگی دارد.

۶-۳ نتیجه‌گیری

در نتیجه بیوگاز مزایای متعددی دارد: (۱) بیوگاز را می‌توان به مواد دیگر تبدیل کرد، (۲) می‌توان بیوگاز را در بطری ریخت و به آسانی حمل کرد؛ و (۳) بیومتان نیز در وسایل نقلیه به عنوان گاز طبیعی فشرده بدون تنظیم موتور استفاده می‌شود (Vijay et al. 2015).

منابع

- Alkhalidi A, Khawaja MK, Amer KA, Nawafleh AS, Al-Safadi MA (2019) Portable biogas digesters for domestic use in Jordanian villages. Recycling 4(2):21. <https://doi.org/10.3390/recycling4020021>
- Ananno AA, Masud MH, Chowdhury SA, Dabnichki P, Ahmed N, Arefin AME (2021) Sustainable food waste management model for Bangladesh. Sustain Prod Consump 27:35–51. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.022>

- Ariunbaatar J, Panico A, Frunzo L, Esposito G, Lens PNL, Pirozzi F (2014) Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods. *J Environ Manage* 146: 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.042>
- Berghuis BA, Yu FB, Schulz F, Blainey PC, Woyke T, Quake SR (2019) Hydrogenotrophic methanogenesis in archaeal phylum Verstraetearchaeota reveals the shared ancestry of all methanogens. *Proc Natl Acad Sci U S A* 116(11):5037–5044. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815631116>
- Champreda V, Mhuanong W, Lekakarn H, Bunternngsook B, Kanokratana P, Zhao XQ, Eurwilaichitr L et al (2019) Designing cellulolytic enzyme systems for biorefinery: from nature to application. *J Biosci Bioeng* 128:637–654. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.05.007>
- Chandra Manna M, Rahman MM, Naidu R, Sahu A, Bhattacharjya S, Wanjarri RH, Khanna SS et al (2018) Bio-waste Management in Subtropical Soils of India: future challenges and opportunities in agriculture. *Adv Agron* 152:87–148. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.07.002>
- Chen X, Romano RT, Zhang R (2010) Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *Int J Agric Biol Eng* 3(4):61–72. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.04.061-072>
- Ghosh A, Debnath B, Ghosh SK, Das B, Sarkar JP (2018) Sustainability analysis of organic fraction of municipal solid waste conversion techniques for efficient resource recovery in India through case studies. *J Mater Cycles Waste Manag* 20(4):1969–1985. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0721-x>
- He D, Xiao J, Wang D, Liu X, Fu Q, Li Y et al (2021) Digestion liquid based alkaline pretreatment of waste activated sludge promotes methane production from anaerobic digestion. *Water Res* 199. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117198>
- Kato S, Igarashi K (2019) Enhancement of methanogenesis by electric syntrophy with biogenic iron-sulfide minerals. *Microbiol Open* 8(3):e64. <https://doi.org/10.1002/mbo3.647>
- Kushkevych I, Cejnar J, Vitězová M, Vitěz T, Dordević D, Bomble YJ (2020) Occurrence of thermophilic microorganisms in different full scale biogas plants. *Int J Mol Sci* 21(1):283
- Lytras G, Lytras C, Mathioudakis D, Papadopoulou K, Lyberatos G (2021) Food waste valorization based on anaerobic digestion. *Waste Biomass Valor* 12:1677–1697. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01108-z>
- Ma Y, Gu J, Liu Y (2018) Evaluation of anaerobic digestion of food waste and waste activated sludge: soluble COD versus its chemical composition. *Sci Total Environ* 643:21–27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.187>
- Meena RAA, Rajesh Banu J, Yukesh Kannah R, Yogalakshmi KN, Kumar G (2020) Biohythane production from food processing wastes—challenges and perspectives. *Bioresour Technol* 298: 122449. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122449>
- Mittal S, Ahlgren EO, Shukla PR (2018) Barriers to biogas dissemination in India: a review. *Energy Policy* 112:361–370. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.027>
- Palaniveloo K, Amran MA, Norhashim NA, Mohamad-Fauzi N, Peng-Hui F, Hui-Wen L, Razak SA et al (2020) Food waste composting and microbial community structure profiling. *Processes* 8:723. <https://doi.org/10.3390/pr8060723>

- Paritosh K, Kushwaha SK, Yadav M, Pareek N, Chawade A, Vivekanand V (2017) Food waste to energy: an overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling. *Biomed Res Int* 2017:2370927. <https://doi.org/10.1155/2017/2370927>
- Rafieenia R, Pivato A, Lavagnolo MC (2019) Optimization of hydrogen production from food waste using anaerobic mixed cultures pretreated with waste frying oil. *Renew Energy* 139: 1077–1085. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.012>
- Shanmugam K, Baroth A, Nande S, Yacout DMM, Tysklind M, Upadhyayula VKK (2019) Social cost benefit analysis of operating compressed biomethane (CBM) transit buses in cities of developing nations: a case study. *Sustainability* 11(15):4190. <https://doi.org/10.3390/su11154190>
- Song Z, Zhang C, Yang G, Feng Y, Ren G, Han X (2014a) Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China. *Renew Sust Energ Rev* 33:204–213
- Song Z, Yang G, Liu X, Yan Z, Yuan Y, Liao Y (2014b) Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. *PLoS One* 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093801>
- Vijay VK, Kapoor R, Trivedi A, Vijay V (2015) Biogas as clean fuel for cooking and transportation needs in India. In: *Advances in bioprocess technology*, pp 257–275. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17915-5_14
- Zamanzadeh M, Hagen LH, Svensson K, Linjordet R, Horn SJ (2017) Biogas production from food waste via co-digestion and digestion- effects on performance and microbial ecology. *Sci Rep* 7(1):17664. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15784-w>
- Zhuang GC, Heuer VB, Lazar CS, Goldhammer T, Wendt J, Samarkin VA, Hinrichs KU et al (2018) Relative importance of methylotrophic methanogenesis in sediments of the Western Mediterranean Sea. *Geochim Cosmochim Acta* 224:171–186. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.12.024>
- Ziemiński K (2012) Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: transformations, stages and microorganisms. *Afr J Biotechnol* 11(18):4127. <https://doi.org/10.5897/ajbx11.054>
- Zou L, Ma C, Liu J, Li M, Ye M, Qian G (2016) Pretreatment of food waste with high voltage pulse discharge towards methane production enhancement. *Bioresour Technol* 222:82–88. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.104>



فرآورده‌های فرعی فرآوری مواد غذایی و استفاده از پسماند برای تولید بیواتانول

چکیده: در سطح جهان، روند رو به افزایش جمعیت و اقتصاد باعث افزایش تقاضای جهانی برای انرژی شده است. اگرچه سوخت‌های فسیلی بیشترین کاربرد را دارند؛ اما منابع مورد استفاده برای تولید سوخت‌های فسیلی به زودی تمام می‌شود. این امر منجر به انتشار گازهای مضر مختلف شده است. در نتیجه، این گازهای مضر باعث گرم شدن زمین از جمله تغییرات مختلف در آب و هوا، محیط زیست و تنوع زیستی شده است. به منظور غلبه بر این چالش کاهش مخازن سوخت فسیلی و گرم شدن زمین، سوخت‌های زیستی گزینه مناسبی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی در نظر گرفته شده‌اند. سوخت‌های زیستی نوعی انرژی سازگار و دوستدار محیط زیست هستند. سوخت‌های زیستی از زیست توده تولید می‌شوند. در طول چند دهه گذشته، محققان به طور مداوم منابع جدیدی را پیدا می‌کنند. این منابع می‌تواند به عنوان ماده اولیه برای تولید سوخت‌های زیستی باشد. از بین انواع سوخت‌های زیستی تولید شده، بیواتانول به دلیل مزایای مختلف مربوط به خواص شیمیایی، هزینه تولید، سازگاری و تاثیر بر محیط زیست، به عنوان یک سوخت زیستی امیدوارکننده شناخته شده است. علاوه بر این، بیواتانول یکی از این سوخت‌های زیستی است؛ که برای تولید آن به منبع کربوهیدرات نیاز دارد. از این رو توجه محققان مختلف در حال حاضر به سمت پسماندهای تولید شده از صنایع غذایی جلب شده است. پسماند مواد

غذایی از بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، شهرداری ها، صنایع، جنگلداری و شرکت‌ها تولید می‌شود. فرآوری پسماند مواد غذایی منبعی غنی از مواد مغذی مختلف هستند. عمدتاً این زباله‌ها یا در محل‌های دفن زباله تلنبار می‌شوند؛ یا به عنوان خوراک دام استفاده می‌شوند. با این حال، گزارش شده است که دفع آنها منجر به خطرات زیست محیطی شدید می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست، پژوهشگران از پسماند غذایی با ارزش به عنوان یک روش موثر برای تبدیل به سوخت زیستی، به ویژه تولید بیواتانول استفاده کرده‌اند. این فصل با اهمیت استفاده از زباله‌های غذایی برای تولید سوخت‌های زیستی، با تمرکز اصلی بر تولید بیواتانول، می‌پردازد. این فصل همچنین انواع مواد اولیه مورد استفاده برای تولید بیواتانول را توضیح می‌دهد. علاوه بر این، انواع مختلف فرآوری پسماند مواد غذایی و روش‌هایی را برای استفاده از آنها برای تولید بیواتانول مشخص می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سوخت زیستی، بیواتانول، زیست توده، فرآوری پسماند مواد غذایی، استفاده مفید از پسماند، مواد اولیه لیگنوسلولزی، بیواتانول نسل دوم

۷-۱ مقدمه

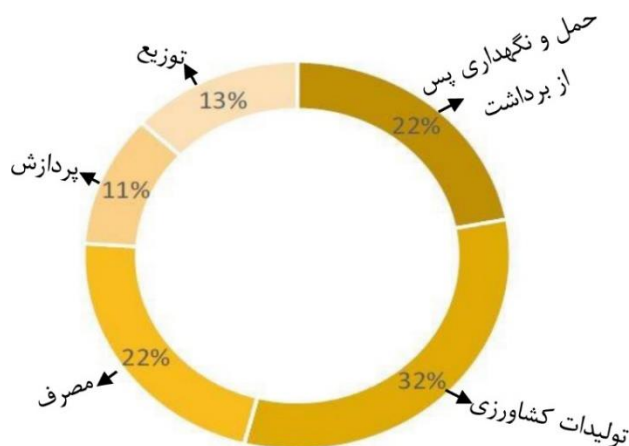
در حال حاضر، تشکیل دهنده اصلی منابع انرژی، سوخت‌های فسیلی هستند. و سهم آن در کل انرژی مصرفی حدود ۸۰ درصد است. بخش حمل و نقل حدود ۵۸ درصد از مصرف سوخت فسیلی را تشکیل می‌دهد (Escobar et al. 2009). رشد مداوم جمعیت جهان و اقتصاد صنعتی منجر به کاهش سوخت‌های فسیلی و در نتیجه افزایش تقاضا برای انرژی شده است. کاهش سریع منابع سوخت‌های فسیلی و ذخایر نفت علت اصلی انتشار گازهای مضر است. گازهای مضر منجر به ذوب یخچال‌ها، از بین رفتن تنوع زیستی، تغییر شرایط آب و هوایی و بالا آمدن سطح دریا می‌شوند. افزایش تقاضای انرژی نیز بر اقتصاد جهانی تأثیر منفی گذاشته است؛ زیرا منجر به افزایش قیمت نفت خام شده است (Agarwal 2007). برای پاسخگویی به تقاضای انرژی و در عین حال در نظر گرفتن مسائل مربوط به گرمایش جهانی، توسعه انرژی جایگزین به یک اولویت بسیار مهم در بخش تحقیق و توسعه تبدیل شده است. یک شکل سازگار با محیط زیست از انرژی جایگزین وجود دارد. این شکل انرژی به عنوان انرژی زیستی شناخته می‌شود. انرژی زیستی از زیست توده تولید می‌شود. در حمایت از این شکل انرژی، دولت، مردم و بخش خصوصی نقش مهمی دارند. محققان در سراسر جهان به طور پیوسته در حال کار برای تولید سوخت زیستی از زیست توده سازگار با محیط زیست هستند؛ زیرا جایگزینی موثر برای سوخت‌های تجدید ناپذیر است (Weldemichael and Assefa 2016). سوخت‌های زیستی را می‌توان به راحتی از زیست

توده استخراج کرد. سوخت‌های زیستی، زیست تخریب پذیر هستند. این سوخت‌ها، به دلیل عدم انتشار دی‌اکسید کربن، پایدار بوده و دوستدار محیط زیست‌اند. تخمین زده شده است که افزایش تقاضا برای سوخت‌های زیستی در بازار خودروها منجر به افزایش فعالیت‌ها و رشد بخش کشاورزی خواهد شد. این رشد به دلیل نیاز بیشتر به محصولات کشاورزی برای تولید سوخت‌های زیستی و محصولات جانبی آنها اتفاق می‌افتد (Kim and Dale 2005; Demirbas 2008). سه نوع سوخت زیستی به سه شکل جامد، مایع و گاز وجود دارد. بر اساس ماهیت شیمیایی و پیچیده زیست توده مورد استفاده به عنوان ماده اولیه، سوخت‌های زیستی به سه نسل اول، دوم و سوم طبقه بندی می‌شوند. به عنوان مثال، سوخت‌های نسل اول، بیودیزل و روغن‌های گیاهی، سوخت‌هایی هستند؛ که از گیاهان زراعی به دست می‌آیند. سوخت‌های نسل دوم شامل بیواتانول و هیدروژن زیستی می‌باشند. سوخت‌های نسل دوم از پسماند کشاورزی و/یا محصولات جانبی و محصولات انرژی‌زا که به مناطق حاصلخیز برای رشد نیاز دارند، به دست می‌آیند. و سوخت‌های نسل سوم شامل بیوگاز و بیوالکل‌ها (اتانول و بیوبوتانول) هستند. بیوگاز و بیوالکل‌ها، از منابع دریایی مانند جلبک‌های دریایی و سیانوباکتری‌ها استخراج می‌شوند. اخیراً، منابع دریایی به دلیل عدم وابستگی به زمین و توانایی تولید زیست توده بزرگ در مدت زمان مورد نیاز، به صورت گسترده در تولید سوخت‌های زیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این منابع، نسبت به سوخت‌های زیستی مبتنی بر گیاهان زمینی که محدودیت بهره برداری از زمین قابل کشت را دارند، مزایای بسیاری دارند (Demirbas 2008).

یکی دیگر از این مواد اولیه سازگار با محیط زیست برای تولید سوخت‌های زیستی، فرآوری پسماند مواد غذایی است. این پسماند، به عنوان زباله‌های غذایی و محصولات جانبی پردازش مواد غذایی نیز شناخته می‌شود. بیشتر پسماند غذایی، محصول نهایی تولید شده از چندین صنعت غذایی است که بازیافت نشده و به عنوان پسماند دفع می‌شود.

عوامل متعددی تقریباً در تمام مراحل فرآوری مواد غذایی در یک صنعت وجود دارند؛ که منجر به هدر رفتن مواد غذایی در مقادیر قابل توجهی می‌شود (سازمان توسعه صنعتی ملل متحد 2012). گزارش شده است که هر ساله نزدیک به $\frac{1}{3}$ میلیارد تن پسماند غذایی دور ریخته می‌شود. این مقدار از پسماند، تقریباً یک سوم تولید جهانی مواد غذایی برای مصرف انسان را تشکیل می‌دهد (Gustavsson et al. 2011, 2013). همچنین گزارش شده است که در کشورهای توسعه یافته، بیشتر پسماند مواد غذایی در نتیجه دفع مواد غذایی توسط مصرف کنندگانی ایجاد می‌شود که بیش از مقدار لازم خرید می‌کنند؛ و مواد غذایی مصرف نشده را

دور می‌ریزند. در حالی که در کشورهای در حال توسعه، علت اصلی هدر رفت مواد غذایی در نتیجه روش‌های برداشت نامناسب، عدم وجود امکانات مناسب، مقررات پردازش و بسته بندی و اطلاعات بازاریابی ناکارآمد است (Zorya et al. 2011). اتلاف غذا، علاوه بر چالش‌های اقتصادی، تغییرات آب و هوایی را نیز به وجود می‌آورد؛ زیرا تولید مواد غذایی به آب، دانه، کود، انرژی، آفت کش و علاوه بر این، نیروی کار نیاز دارد. در سال ۲۰۱۴، سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد اعلام کرد؛ که علاوه بر جلوگیری از بهره برداری از منابع طبیعی، کاهش هدر رفت مواد غذایی و همچنین تقاضا برای افزایش تولید مواد غذایی را تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد؛ تا نیازهای جمعیت را تا سال ۲۰۵۰ تامین کند (سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد 2013a). اتلاف نسبی جهانی غذا در زنجیره تامین مواد غذایی در شکل ۷-۱ نشان داده شده است. پسماند غذایی شامل طیف گسترده ای از اجزای آلی مانند کربوهیدرات‌ها (۶۹-۳۵/۵ درصد)، پروتئین‌ها (۲۱/۹-۳/۹ درصد)، اسیدهای آلی، روغن و چربی‌ها (Kiran et al. 2014; Axelsson et al. 2012) است. اجزای قند و پروتئین پسماند غذا استخراج و به قند تخمیر پذیر و نیتروژن آزاد آمینه^۱ تجزیه می‌شوند. استفاده از زیست توده برای تولید سوخت زیستی ارزش آن را در مقایسه با استفاده از آن در تولید مواد شیمیایی، برق و خوراک دام افزایش می‌دهد (Lin et al. 2013; Tuck et al. 2012). علاوه بر این، استفاده مفید از پسماند غذایی و تبدیل به سوخت‌های زیستی می‌تواند وابستگی به نفت خام را کاهش دهد (Li and Yang 2016).



شکل ۷-۱. اتلاف نسبی غذا در زنجیره تامین مواد غذایی در جهان (برگرفته از سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد 2013b)

1. Free amino nitrogen (FAN)

از بین بسیاری از سوخت‌های زیستی، بیواتانول به عنوان امیدوارکننده‌ترین جایگزین سوخت‌های فسیلی شناخته شده است. بیواتانول می‌تواند از انواع منابع تجدیدپذیر که غنی از کربوهیدرات هستند، تولید شود. چندین کشور از جمله ایالات متحده آمریکا، چین، برزیل و کانادا و کشورهای مختلف عضو اتحادیه اروپا موافقت خود را با برنامه‌های تولید بیواتانول به منظور کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی اعلام کرده‌اند (Zabed et al. 2016). به طور معمول، بیواتانول از محصولات غنی از مقادیر نشاسته مانند نیشکر، برنج، ذرت و سیب زمینی تولید می‌شود (Kiran et al. 2014). با این حال، پسماند مختلف فرآوری مواد غذایی و کشاورزی نیز به عنوان جایگزین مناسبی برای تولید بیواتانول شناسایی شده است. این پسماندها شامل؛ پوست سبزیجات و میوه‌ها، دانه‌ها، پنیر و پنیرسویا توفو^۱، خون، استخوان، آب فرآوری شده و لجن تصفیه فاضلاب می‌باشد. این پسماندهای غذایی، از مواد مغذی ارزشمندی تشکیل شده‌اند. این مواد مغذی به عنوان زیست توده‌های با ارزش شناخته می‌شوند (Dar et al. 2019).

این فصل به اهمیت اتانول زیستی به عنوان سوخت زیستی، مواد اولیه و مراحل مربوط به تولید آن می‌پردازد. در درجه اول بر توصیف برخی از فرآوری‌های مواد غذایی توسط محصولات و پسماند تمرکز دارد. این پسماند به جای دفع می‌تواند در تولید بیواتانول استفاده شوند. این فصل بر نیاز به پیش‌بینی پسماند غذایی که می‌تواند به عنوان یک ماده اولیه بالقوه برای تولید سوخت‌های زیستی مانند بیواتانول استفاده شود، تأکید می‌کند.

۷-۲ کاربردهای بیواتانول

از بین تمام سوخت‌های زیستی تجاری موجود، بیواتانول یکی از پرمصرف‌ترین سوخت‌های مایع است. بیواتانول را می‌توان برای استفاده منظم با بنزین ترکیب کرد. این امر به مقادیر بالای اکسیژن (۳۵ درصد) اتانول نسبت داده می‌شود. اکسیژن بالا موجب افزایش احتراق هیدروکربن‌ها می‌شود. همچنین، انتشار مونوکسید کربن و سایر هیدروکربن‌های بالقوه خطرناک را کاهش می‌دهد (Gebregergs et al. 2016). در نتیجه، بیواتانول تأثیر منفی نسبتاً کمتری بر محیط زیست نسبت به سایر سوخت‌ها دارد؛ و سوخت زیستی سازگار با محیط

۱. توفو یک ماده غذایی است و از شیر سویا تهیه می‌شود. توفو معمولاً به شکل مکعب‌های سفید رنگی است که در آب یا سس نگهداری می‌شود. توفو طعم و بافت خنثی و نرمی دارد.

زیست با مقبولیت بالاتر است. بیواتانول را می‌توان به طور مستقیم یا در ترکیب با بنزین استفاده کرد. بنابراین می‌توان بیواتانول را به جای بنزین در خودروها، موتورهای دیزلی و سایر سیستم‌های احتراقی استفاده کرد. ترکیب اتانول زیستی و بنزین به دلیل عداد اکتان بالای اتانول (۱۱۰-۱۰۶) نسبت به بنزین (۹۶-۹۱) مناسب‌ترین است (Bhuvaneswari and Sivakumar 2019; Zabed et al. 2016). خاصیت اتانول زیستی امکان احتراق آن را با نسبت تراکم بالاتر با دوره احتراق کوتاه‌تر فراهم می‌کند. این امر منجر به ضربه کمتر موتور می‌شود. علاوه بر این، بیواتانول دارای آنتالپی تبخیر بالاتر (۱۱۷۷ کیلوژول بر کیلوگرم در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد) در مقایسه با بنزین (۳۴۸ کیلوژول بر کیلوگرم در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد) است. همچنین سرعت شعله آرام^۱ بیواتانول نسبتاً بالاتر است (در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۳۲۵ کلوین حدوداً ۳۳ برای بنزین سانتیمتر بر ثانیه و برای بیواتانول حدوداً ۳۹ سانتیمتر بر ثانیه است) (Naik et al. 2010; Bayraktar 2005; Al-Hasan 2003). علاوه بر این، بیواتانول (۸۴۰ کیلوژول بر کیلوگرم) نسبت به بنزین (۳۰۵ کیلوژول بر کیلوگرم)، گرمای بالاتری برای تبخیر دارد. گرمای بالای تبخیر بیواتانول، باعث افزایش بازده حجمی مخلوط بیواتانول نسبت به بنزین خالص می‌شود؛ و در نتیجه توان خروجی را افزایش می‌دهد (Lynd 1996). یکی از این ترکیبات بیواتانول-بنزین معروف به E85 (۸۵ درصد بیواتانول و ۱۵ درصد بنزین) در وسایل نقلیه مختلف سبک استفاده می‌شود (Bhuvaneswari and Sivakumar 2019). در مقایسه با بنزین، بیواتانول شامل نسبت ناچیزی از گوگرد است. با این حال، ترکیب بنزین با بیواتانول، منجر به کاهش کل مقادیر گوگرد در سوخت و همچنین کاهش در انتشار اکسید گوگرد می‌شود. اکسید گوگرد، سرطان‌زا و مسئول ایجاد باران اسیدی می‌باشد. علاوه بر این، گزارش شده است که اتانول زیستی به عنوان جایگزین ایمن برای متیل بوتیل اتر استفاده می‌شود. متیل بوتیل اتر بیشتر برای افزایش‌دهنده عدد اکتان در بنزین استفاده می‌شود (Zabed et al. 2016). خواص بنزین و بیواتانول در جدول ۷-۱ ارائه شده است.

۱. سرعت شعله آرام یک ویژگی ذاتی مخلوط‌های قابل احتراق از پیش مخلوط شده است. این سرعتی است که در آن یک شعله آرام و بدون کشش در میان مخلوطی از واکنش‌دهنده‌های نسوخته منتشر می‌شود.

جدول ۷-۱. خواص بنزین و اتانول (برگرفته از 2004 Yüksel and Yüksel)

مشخصات	گازوئیل	بیواتانول
فرمول شیمیایی	$C_nH_{2n} + 2 \ (n = 4 - 12)$	C_2H_5OH
مقدار (گرم در مول)	۱۰۰-۱۰۵	۴۶/۰۷
عدد اکتان	۸۸-۱۰۰	۱۰۸
چگالی (کیلوگرم بر دسی متر مکعب)	۰/۶۹-۰/۷۹	۰/۷۹
نقطه جوش (درجه سانتی گراد)	۲۷-۲۲۵	۷۸
نقطه انجماد (درجه سانتی گراد)	-۲۲/۲	-۹۶/۱
نقطه اشتعال (درجه سانتی گراد)	-۴۳	۱۳
دمای اشتعال خودبه خودی (درجه سانتی گراد)	۲۷۵	۴۴۰
ارزش حرارتی پایین (۱۰۲ کیلوژول بر دسی متر مکعب) ^۱	۳۰-۳۳	۲۱/۱
حرارت تبخیر پنهانی (کیلوژول بر کیلوگرم)	۲۸۹	۸۵۴
حلالیت در آب	نامحلول	محلول

۷-۳ تولید بیواتانول

بیواتانول را می‌توان از انواع فرآوری پسماند مواد غذایی و محصولات جانبی تولید کرد. از آنجایی که بیواتانول بیشتر از طریق تخمیر مواد قندی گیاهان و محصولات نشاسته‌ای تولید می‌شود، به الکل غلات نیز معروف است (Shah and Sen 2011). اگرچه می‌توان از هر نوع کربوهیدرات برای تولید این سوخت استفاده کرد؛ اما مواد اولیه معمولاً به دو دسته، یعنی ساکارز حاوی مواد مغذی و محصولات نشاسته‌ای طبقه بندی می‌شوند. با پیشرفت اخیر در توسعه فناوری، مواد زائد لیگنوسلولزی مانند چوب، تفاله نیشکر و کاه به عنوان زیست توده سلولزی شناخته می‌شوند. این مواد به عنوان ماده اولیه مناسب برای تولید اتانول زیستی مقرون به صرفه شناخته شده‌اند (Demirbas 2008; Balat 2011; Shah and Sen 2011). با این حال، مطالعات نشان داده‌اند؛ که فرآیند تولید بیواتانول از زیست توده لیگنوسلولزی نسبت به محصولات نشاسته‌ای پیچیده‌تر و زمان‌برتر است. و هزینه بالاتری دارد (Shah and Sen 2011). مواد خام به کار رفته در تولید این سوخت نقش ضروری در تعیین بازده انرژی دارد. مطالعات نشان داده است که نیشکر و بیواتانول سلولزی در مقایسه با انرژی فسیلی ۹ برابر انرژی تولید می‌کنند. در چند سال گذشته، از انواع زیست توده مورد استفاده

۱. این مقدار معمولاً به عنوان یک معیار مهم در بررسی کارایی سوخت‌ها و قابلیت انرژی‌زایی آنها استفاده می‌شود.

برای تولید بیواتانول، آب نیشکر و شیرۀ نیشکر^۱ بیشترین بهره برداری را برای تولید بیواتانول هیدراته و بدون آب داشته است (Kamani et al. 2019). علاوه بر این، چندین مطالعه اخیر استفاده بالقوه (توسط شبیه سازی نرم افزاری) از فناوری هایی را که می توانند در کاهش اثرات زیست محیطی کمک کنند، نشان داده اند. با این وجود، بررسی هزینه پردازش، خلوص اتانول زیستی حاصل از زیست توده های مختلف و اجرای عملی سیستم ها هنوز ضروری است، زیرا این ها چالش های اصلی در طول تولید بیواتانول هستند (Dahiya et al. 2018). علاوه بر این، در طول تولید بیواتانول، مقدار زیادی زباله تولید می شود؛ که باید از این پسماندها به طور مفید استفاده شود. این به این دلیل است؛ که زباله ها نیز می توانند برای تولید بیواتانول بیشتر به دلیل وجود سایر ترکیبات ارزشمند مورد استفاده مجدد قرار گیرند (Kamani et al. 2019).

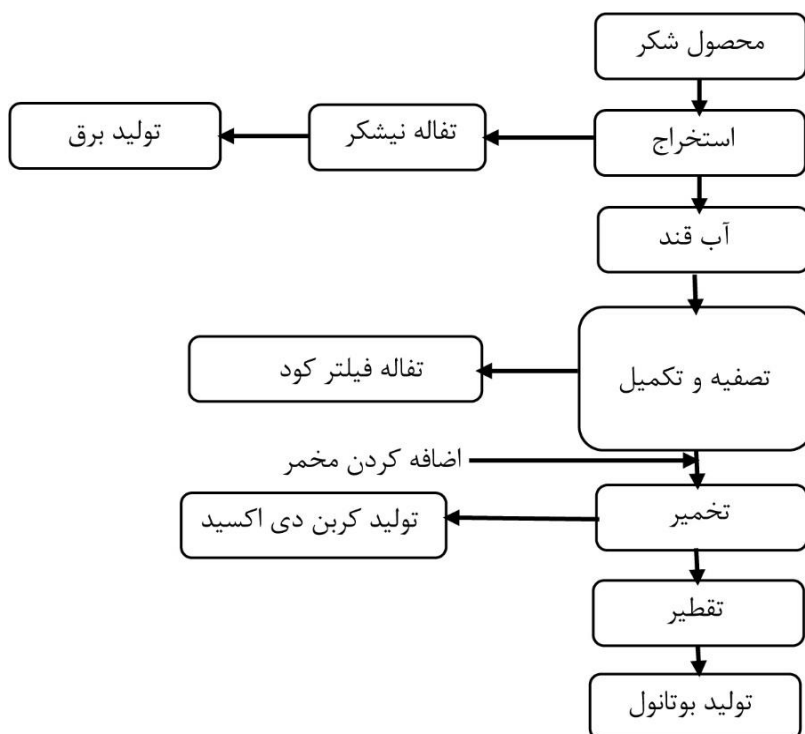
منابع تجدیدپذیر مورد استفاده برای تولید بیواتانول به طور گسترده به قندها، نشاسته، زیست توده لیگنوسلولزی و جلبک طبقه بندی می شوند. اتانول تولید شده از قندها و مواد خام مبتنی بر نشاسته به عنوان اتانول زیستی نسل اول شناخته می شود. در حالی که اتانول تولید شده از زیست توده لیگنوسلولزی و جلبک ها به ترتیب به عنوان بیواتانول نسل دوم و سوم شناخته می شوند. اگرچه تولید بیواتانول از جلبک ها هنوز یک زمینه جدید است؛ و تاکنون فقط در محدوده تحقیقات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما سایر انواع زیست توده نشان داده اند؛ که قابلیت بیشتری را به عنوان مواد اولیه برای تولید بیواتانول در مقیاس تجاری دارند. تولید بیواتانول از سه نوع اصلی مواد اولیه، به ویژه با توجه به استخراج محلول های قندی، به طور قابل توجهی متفاوت است. مواد اولیه مبتنی بر قند برای به دست آوردن قندهای قابل تخمیر فقط به فرآیند استخراج نیاز دارند. با این حال، مواد اولیه مبتنی بر نشاسته برای تبدیل نشاسته به گلوکز نیاز به هیدرولیز دارند. و زیست توده لیگنوسلولزی باید قبل از هیدرولیز برای اصلاح ساختارهای سلولزی برای دسترسی به آنزیم، آماده سازی شود (Zabed et al. 2016).

۷-۳-۱ مواد اولیه بر پایه قند

تولید بیواتانول از زیست توده به طور گسترده شامل فرآیندهایی مانند هیدرولیز آنزیمی، تخمیر و تقطیر/آبگیری است. در مرحله اول، ترکیبات همو و هتروپلی ساکارید زیست توده مورد استفاده برای تولید بیواتانول به صورت آنزیمی یا توسط اسیدهای رقیق به قندها هیدرولیز می شوند. این فرآیند به عنوان فرآیند ساکارزی کردن نیز شناخته می شود؛ و محلول حاوی قند

۱. ملاس یا شیرۀ نیشکر یکی از محصولات جانبی کارخانه های تولید قند و شکر است که در طی استخراج قند از چغندر قند و نیشکر پس از اینکه شیرۀ قند غلیظ شده و از توربین ها عبور کرد باقی می ماند.

قابل تخمیر را تولید می‌کند (Bhuvanewari and Sivakumar 2019; Shah and Sen 2019; Gavahian et al. 2011). محلول به دست آمده را می‌توان با آنزیم اینورتاز استخراج شده از مخمر برای آزاد کردن قندهای ساده، به عنوان مثال، گلوکز و فروکتوز، هیدرولیز کرد. پس از آن، قندهای ساده با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* برای تولید بیواتانول بیشتر تخمیر می‌شوند (Dudley 2004; Panda et al. 2018; Demirbas 2008; Gavahian et al. 2019). آخرین مرحله در تولید این سوخت زیستی تقطیر/آبگیری است. این مرحله برای استخراج و تغلیظ بیواتانول روی محیط کشت مایع تخمیر شده انجام می‌شود. این مرحله انرژی گسترده‌ای را مصرف می‌کند؛ و بخش قابل توجهی از هزینه تولید بیواتانول را تشکیل می‌دهد (Gavahian et al. 2019). به طور کلی، محیط کشت مایع تخمیر شده شامل تقریباً ۱۲ درصد اتانول است. این اتانول می‌تواند تا ۹۶ درصد با فرآیند تقطیر خالص شود. مراحل کلی مرتبط با در تولید بیواتانول از مواد اولیه قندی به صورت الگوی در شکل ۷-۲ نشان داده شده است.



شکل ۷-۲. نمایش الگوی تولید بیواتانول از مواد اولیه مبتنی بر قند (برگرفته از 2008 Ramírez de la Piscina and Homs)

۷-۳-۲ مواد اولیه مبتنی بر نشاسته

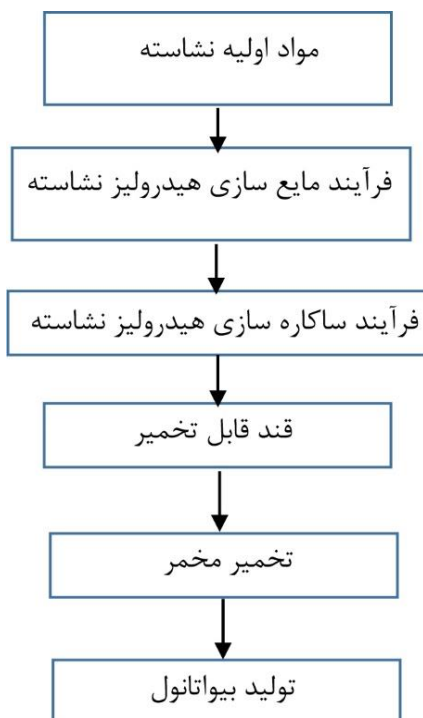
به غیر از مواد اولیه قندی، مواد مبتنی بر نشاسته نیز برای تولید بیواتانول استفاده می‌شود. نشاسته ترکیبی از پلی گلوکان‌های خطی (آمیلوز) و شاخه دار (آمیلوپکتین) با استفاده از آنزیم آلفا-آمیلاز هیدرولیز می‌شود. این آنزیم، فقط روی پیوندهای آلفا-۱،۴ آمیلوز فعال است؛ و روی پیوندهای آلفا-۱،۶ در آمیلوپکتین فعال نیست (Mousdale 2008). به منظور تولید بیواتانول با استفاده از این ماده اولیه، هیدرولیز نشاسته با استفاده از آلفا-آمیلاز و گلوکواامیلاز یک مرحله ضروری برای به دست آوردن شیره گلوکز است. سپس، شیره گلوکز با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* به اتانول تبدیل می‌شود. این مرحله به هزینه کلی تولید بیواتانول از مواد اولیه حاوی قند اضافه می‌کند (Ricardo Soccol et al. 2011). باکتری *باسیلوس لیچنیفورمیس*^۱ و سویه‌های اصلاح شده ژنتیکی باکتری *اشریشیا کلی* و *باسیلوس سوبتیلیس* برای تولید آلفا-آمیلاز استفاده می‌شوند؛ در حالی که مخمر *اسپرژیلوس نیجر* و گونه ریزوپوس برای تولید گلوکومیلاز استفاده می‌شود (Shigechi et al. 2004). بیواتانولی که از مواد اولیه مبتنی بر نشاسته تولید می‌شود، با استفاده از آنزیم‌ها و سویه‌های مخمر با مقاومت بالا در برابر اتانول، به افزایش کاربردهای آن کمک می‌کند. اما بیواتانول تولید شده از خوراک‌های مبتنی بر قند، قابلیت مقاومت کمتری در برابر اتانول دارد (Schubert 2006). مراحل کلی مرتبط با تولید بیواتانول از مواد اولیه مبتنی بر نشاسته به صورت الگوی در شکل ۷-۳ نشان داده شده است.

۷-۳-۳ مواد اولیه لیگنوسلولزی

فرآیند تولید بیواتانول بسته به نوع ماده اولیه مصرفی متفاوت است. در برخی موارد از مواد اولیه لیگنوسلولزی برای تولید بیواتانول استفاده می‌شود. لیگنوسلولز مجموعه‌ای از پلی کربوهیدرات‌های متشکل از لیگنین، سلولز و همی سلولز است. مواد اولیه لیگنوسلولزی در ابتدا جهت جداسازی سلولز و همی سلولز قبل از آماده‌سازی برای هیدرولیز، آماده می‌شوند. این مرحله، برای شکستن ماتریس، کاهش درجه کریستالی سلولز، منبسط کردن بخشی از سلولز غیرمتبلور و اساساً ایجاد مواد اولیه لیگنوسلولز است. این مواد اولیه بسیار حساس به تصفیه بیشتر، مانند هیدرولیز هستند. هیدرولیز برای افزایش عملکرد قندهای مونومری ضروری است. آماده‌سازی زیست توده می‌تواند با استفاده از روش‌های فنی مختلف انجام شود. این روش‌های فنی می‌توانند به چهار دسته‌ی فیزیکی، شیمیایی، فیزیکی و شیمیایی، و بیولوژیکی تقسیم

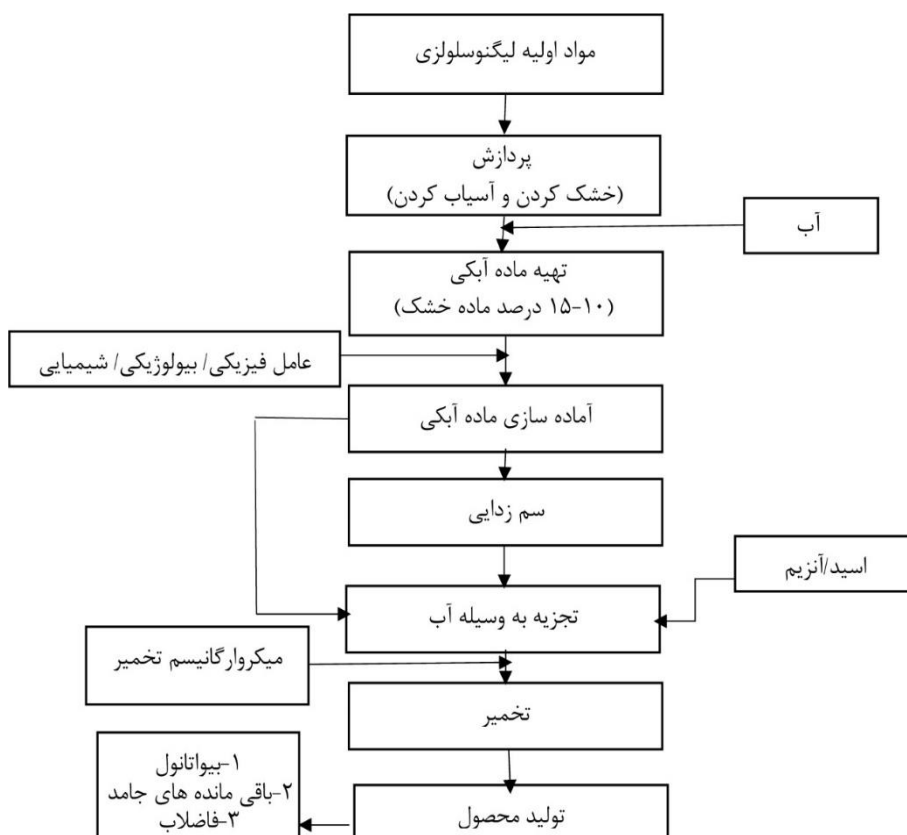
1. *Bacillus licheniformis*

شوند. در دسته‌ی فیزیکی، می‌توان از روش‌هایی مانند کاهش اندازه زیست توده، حرارت دادن با میکروویو، و تجزیه به وسیله حرارت و تابش غیرحرارتی استفاده کرد. در دسته‌ی شیمیایی، می‌توان از روش‌هایی مانند اکسیداسیون مرطوب و تصفیه با استفاده از اسیدها یا قلیاها استفاده کرد. در دسته‌ی فیزیکی و شیمیایی، می‌توان از روش‌هایی مانند استفاده از بخار، فیبر آمونیاک، یا قرار دادن تحت فشار دی اکسید کربن استفاده کرد. و در نهایت، در دسته‌ی بیولوژیکی، می‌توان از روش تصفیه میکروبی با استفاده از انواع قارچ‌ها استفاده کرد (Sarkar et al. 2012).



شکل ۷-۳. نمایش الگوی تولید بیواتانول از مواد اولیه نشاسته ای (برگرفته از Woiciechowski et al. 2016)

پس از آماده سازی، زیست توده پیش تصفیه شده تحت هیدرولیز آنزیمی سلولز و همی سلولز قرار می‌گیرد؛ تا شکل قابل تخمیر قندهایی مانند گلوکز، گالاکتوز، آرابینوز، زایلوز و مانوز تولید شود. این مرحله شامل شکستن پیوندهای گلیکوزیدی برای به دست آوردن قندهای هیدرولیز شده مانند پنتوز و هگروز است. سپس این قندها برای تولید بیواتانول تخمیر می‌شود (Sarkar et al. 2012; Demirbas 2008). مراحل کلی مرتبط با تولید بیواتانول از مواد اولیه لیگنوسلولزی به صورت شماتیک در شکل ۷-۴ نشان داده شده است.

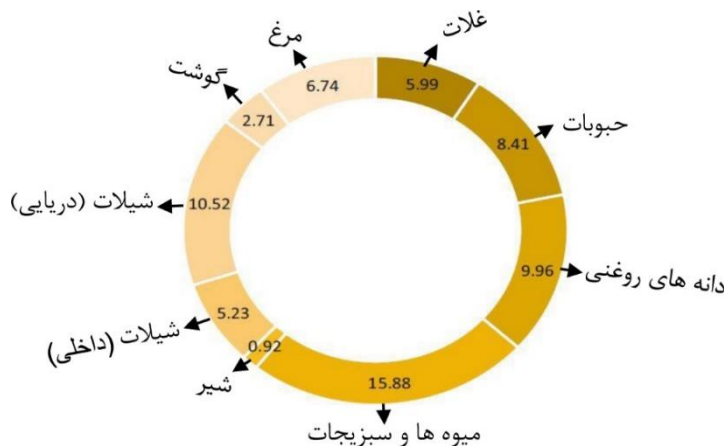


شکل ۷-۴. نمایش الگوی تولید بیواتانول از مواد اولیه لیگنوسلولزی (برگرفته از Zabed et al. 2016)

۷-۴ اهمیت استفاده از محصولات فرعی و فراوری پسماند مواد غذایی برای تولید بیواتانول

سازمان کشاورزی مواد غذایی برای دستیابی به هدف خاص خود در اهداف توسعه پایدار طراحی شده است. این هدف به طور خاص برای تضمین امنیت غذایی برای جمعیت جهان، که به سرعت در حال افزایش است، مدنظر قرار می گیرد. تخمین زده شده است که حدود ۴۴ تا ۴۷ درصد از کل پسماند غذایی توسط خانوارها تولید می شود؛ و بخش قابل توجهی از این پسماند (۲۳/۲۸ درصد) از قسمت های غیرقابل مصرف میوه ها و سبزیجات تازه شامل پوست کندن میوه، پوسته و همچنین برش میوه می باشد (Open Working Group on Sustainable Development 2015; De Laurentiis et al. 2018). این گونه پسماندها به عنوان زباله های اجتناب ناپذیری شناخته شده اند؛ که بدون توجه به اقدامات پیشگیرانه، تولید

می‌شوند؛ مگر اینکه در الگوی مصرف تغییری ایجاد شود. از این رو، اهمیت استفاده مؤثر از روش‌های پردازش و تصفیه برای تبدیل این منابع به محصولات مفید، مانند سوخت‌های زیستی، برای مدیریت و بهره‌برداری از قابلیت‌های این منابع بسیار حائز اهمیت است (Shehu et al. 2019). هدر رفت کلی مواد غذایی در سراسر هند در شکل ۷-۵ نشان داده شده است. پسماند از بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، شهرداری‌ها، صنایع، جنگلداری و شرکت‌ها تولید می‌شود (Gosavi et al. 2017). در حال حاضر پسماندها به یک نگرانی اصلی در سطح جهانی، به ویژه در اروپا و کشورهای در حال توسعه مانند هند و چین تبدیل شده‌اند (Lin et al. 2013). پسماند غذایی به عنوان باقی مانده‌هایی توصیف می‌شود که پس از پردازش یک محصول اولیه باقی می‌ماند. بخش زیادی از سوخت جامد و مایع به دلایل مختلفی از جمله تهیه، تولید و مصرف مواد غذایی، تلفات فرآوری، سیستم‌های حمل و نقل نامناسب، آلودگی در حین نگهداری و بسته بندی نامناسب از صنایع مختلف غذایی تولید می‌شود (Giroto et al. 2015). زباله‌های غذایی مانند پوست و دانه‌های میوه و سبزیجات، پنیر و پنیرسویا، خون، فاضلاب و استخوان شامل چندین ماده مغذی ارزشمند است. بنابراین این مواد، نشان دهنده زیست توده ارزشمند است.



شکل ۷-۵. درصد هدر رفت مواد غذایی (برگرفته از Ministry of Food Processing Industries 2015)

با این حال، اگر این مواد تصفیه و مدیریت نشوند، تجزیه بی رویه آنها به دلیل انتشار ترکیبات سمی و متان منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود (Waldron 2007). از این رو، استفاده از این پسماند که معمولاً دفع می‌شوند، یک روش مؤثر و ارزان تر برای تولید بیواتانول است (Gosavi et al. 2017). اخیراً توجه زیادی به زیست توده لیگنوسلولزی به عنوان یک ماده

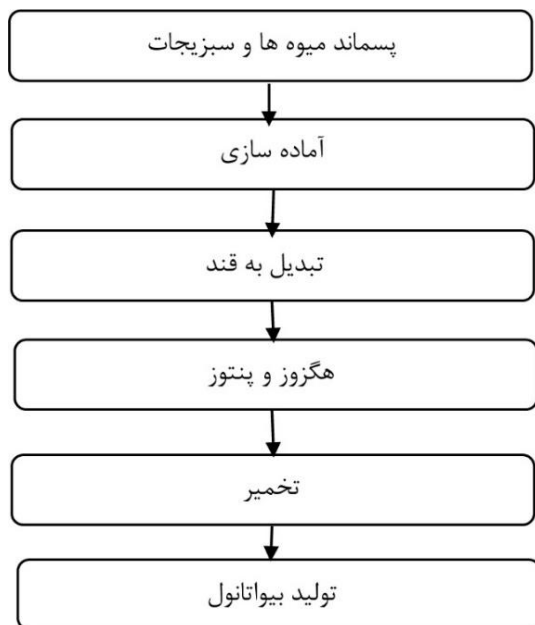
اولیه بالقوه برای تولید مواد شیمیایی، سوخت و همچنین بیواتانول سازگار با محیط زیست انجام شده است (Al Azkawi et al. 2018). چندین کشور انرژی زیستی را به عنوان انرژی توصیف می‌کنند. این انرژی از پسماند زیست تخریب پذیر و باقی مانده‌های میوه‌ها و سبزیجات به دست می‌آید (Panda et al. 2018). در سال‌های اخیر، اشکال مختلفی از زباله‌ها برای تولید انواع سوخت‌های زیستی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. معمولاً زباله‌های تولید شده از بخش‌های مختلف در محل‌های تلنبار زباله یا محل‌های دفن زباله دور ریخته می‌شوند. این زباله‌ها، منجر به آلودگی زمین و آب می‌شود (Hossain et al. 2011). اگر از زباله برای تولید سوخت‌های زیستی استفاده شود، می‌توان از این آلودگی نامطلوب زیست محیطی جلوگیری کرد (Tock et al. 2010). در ابتدا، تولید اتانول زیستی نسل اول به عنوان یک راه حل بالقوه برای چالش‌های شناسایی شده با سوخت‌های فسیلی شناسایی شد. اما به دلیل استفاده از مواد خام خوراکی و نیاز به مصرف گسترده زمین برای تولید محصولات سوخت زیستی، تولید اتانول زیستی نسل اول با برخی از اثرات نامطلوب مواجه شد. تبدیل محصولات غذایی به مواد اولیه برای تولید سوخت‌های زیستی نه تنها هزینه‌های غذایی را افزایش می‌دهد؛ بلکه منجر به مشکلات اجتماعی و اقتصادی نیز می‌شود. برای غلبه بر این چالش‌ها، محققان نسل دوم بیواتانول را از زیست توده زباله توسعه دادند. این زیست توده هزینه کمی یا هیچ هزینه‌ای ندارد؛ بنابراین هزینه کلی تولید سوخت زیستی را کاهش می‌دهد. با این حال، کشورهای در حال توسعه مختلف در هنگام دفع این زباله‌ها با چالش‌های متعددی مواجه شده‌اند. این چالش‌ها منجر به نابودی گسترده محیط مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. در نتیجه تبدیل این پسماند به منبعی برای تولید انرژی به حل دو چالش کمک می‌کند. این دو چالش شامل؛ کاهش هزینه‌های انرژی و ارائه روشی سازگار با محیط زیست برای دفع آنچه که به طریقی باعث آلودگی می‌شود (Gebregergs et al. 2016).

۷-۵ بیواتانول از محصولات فرعی و فرآوری پسماند مواد غذایی

۷-۵-۱ بیواتانول از سبزیجات و میوه‌ها

در طول فرآوری میوه‌ها، حدود ۳۰-۵۰ درصد از محصولات جانبی بر اساس تنوع میوه‌های فرآوری شده تولید می‌شوند. محصولات جانبی تولید شده شامل پیش پردازش محصولات مانند ساقه میوه، ساقه و همچنین میوه‌های فاسد از فرآیندهای مرتب سازی و پردازش محصولات جانبی مانند دانه‌ها، گوشت میوه، پوست و تفاله است. جزء اصلی فاضلاب تولید شده از گیاهان پردازش میوه و سبزیجات شامل پکتین، قندها، ویتامین‌ها، نشاسته‌ها و سایر

اجزای دیواره سلولی است (Dar et al. 2019). مراحل کلی مرتبط با تولید بیواتانول از پسماند سبزیجات و میوه‌ها به صورت الگو در شکل ۷-۶ نشان داده شده است.



شکل ۷-۶. مراحل کلی مربوط به تولید بیواتانول از پسماند میوه‌ها و سبزیجات (برگرفته از Bhuveneswari and Sivakumar 2019)

۷-۵-۲ بیواتانول از پسماند موز

موز یکی از محصولات اصلی میوه ای است. موز به طور گسترده در سراسر جهان رشد می‌کند. همچنین، این محصول به طور گسترده ای در آسیا و آمریکا (به ترتیب ۵۶ درصد و ۲۶ درصد) و علاوه بر این، استرالیا کشت می‌شود. هر ساله در طی فرآیند حمل و نقل یا درجه بندی پس از برداشت، بخش زیادی از محصول موز دفع، هدر یا دور ریخته می‌شود؛ سپس در زمین هایی که در آلودگی محیط زیست نقش دارند، دفن می‌شود. با این حال، این پسماند کم‌هزینه از جمله موز فاسد و پوست آن‌ها را می‌توان برای تولید اتانول زیستی نسل دوم استفاده کرد؛ زیرا حاوی قندها و مواد معدنی ارزشمندی است. این مواد برای فرآیند تخمیر ضروری هستند (Guerrero and Muñoz 2018). علاوه بر گلوکز، پسماند موز شامل کربوهیدرات‌های مختلف دیگری نیز می‌باشند. این کربوهیدرات‌ها، می‌توانند با فرآیند هیدرولیز آنزیمی با استفاده از آنزیم‌هایی مانند سلولازها، همی سلولازها و پکتین به قندهای ساده تبدیل شوند

(Bhuvaneshwari and Sivakumar 2019). به منظور تولید بیواتانول، پسماند موز جمع آوری، شسته شده، به قطعات کوچک برش داده شده و در آفتاب خشک می‌شوند. پس از آن، پسماند موز خشک شده را خرد کرده، به خوبی آسیاب کرده و با آب مقطر مخلوط می‌کنند. گاهی اوقات از پسماند موز نیز بدون خشک شدن استفاده می‌شود. با این حال، در چنین مواردی، شستن پسماند و له کردن آن به خوبی ضروری است. در هر صورت، مخلوط له شده یا پودری پسماند موز باید اتوکلاو شود؛ سپس ماده اولیه استریل شده در معرض هیدرولیز بیشتر قرار می‌گیرد. به ماده اولیه، ۲/۵-۵ درصد (حجمی/حجمی) اسید سولفوریک رقیق شده اضافه می‌شود. مخلوط در دمای ۷۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ تا ۳۰ دقیقه نگهداری می‌شود. در ادامه، این مخلوط با استفاده از آنزیم‌هایی مانند سلولازها، همی سلولازها و پکتین در pH در محدوده ۴/۵ تا ۵/۵ تحت هیدرولیز آنزیمی قرار می‌گیرد (Wu et al. 2017) و در ۵۰ درجه سانتیگراد برای یک ساعت "سلول‌های میکروبی به محیط کشت اضافه" می‌شود. پس از انجام این فرآیند، هیدرولیز استریل با کشت مخمر ۱۸ تا ۲۴ ساعته مخلوط می‌شود؛ و به صورت بی‌هوازی با تکان دادن مداوم در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، pH ۵-۵/۵ به مدت ۷-۳ روز سلول‌های میکروبی به محیط کشت اضافه می‌شود. در طول این فرآیند، مقدار کمی را می‌توان برای بررسی غلظت بیواتانول تولید شده آزمایش کرد. بیواتانول تولید شده در این فرآیند مستقیماً متناسب با مقادیر آب مواد اولیه است. با دستیابی به غلظت مورد نظر بیواتانول، سپس تحت فرآیند تقطیر قرار می‌گیرد (Bello et al. 2014). مطالعات انجام شده برای تجزیه و تحلیل عناصر موجود در بیواتانول گزارش داده‌اند؛ که غلظت عناصر بسیار کم یا ناچیز است. مطالعات همچنین نشان داد؛ که غلظت مواد معدنی سمی مانند سرب، کروم و مولیبدن صفر ppm است؛ و مواد معدنی مانند منگنز، فسفر، منیزیم و کلسیم بیشتر است (Hossain et al. 2011). با این حال، با وجود غلظت بالاتر، این مواد معدنی برای محیط زیست سمی نیستند؛ بنابراین، بیواتانول به عنوان یک سوخت پایدار شناخته شده است. تولید بیواتانول از زباله موز یک روش بالقوه برای تولید بیواتانول نسل دوم را نشان می‌دهد (Bhuvaneshwari and Sivakumar 2019).

۷-۵-۳ بیواتانول از پسماند مرکبات

یکی دیگر از محصولات رایج کشت شده در سرتاسر جهان، مرکبات است. تولید پرتقال در سراسر جهان نزدیک به ۵۰/۲ میلیون تن است (Cypriano et al. 2018). اگر میوه‌ها به درستی ذخیره، حمل و نقل و خرده‌فروشی نشوند، مقدار زیادی از آن‌ها هدر خواهد رفت. در مراحل تولید آب پرتقال، پسماند مختلفی از جمله تفاله شناور مرکبات، پوست، الیاف و

بافت‌های داخلی تولید می‌شود. این پسماند حاوی مقادیر زیادی قند، پروتئین، پکتین، سلولز و همی سلولز است. پسماند مرکبات هنگامی که در مخزن شناور پردازش می‌شوند؛ منجر به مسدود شدن سطح منافذ مخزن می‌شود. پسماند مرکبات، زمانی که در مکان‌های داخلی دفع می‌شود، منجر به آلودگی محیط می‌شود. با این حال، هزینه نسبتاً پایین این پسماند و وجود قندهای فراوان، آنها را به ماده اولیه مناسبی برای تولید بیواتانول تبدیل می‌کند (Girish et al. 2014). میوه‌ها و پوست مرکبات فاسد به عنوان ماده اولیه برای تولید اتانول زیستی نسل دوم استفاده می‌شود. این پسماند با استفاده از کشت تک مخمرها یا با کشت مشترک مخمر با سویه مخمر دیگری به نام *پاراپسیلوز کاندیدا* NRRLY-12969 تخمیر می‌شود. کشت مشترک مخمرها یک روش فنی موثر است؛ زیرا قندهای غیرقابل دسترس مانند پنتوزها نیز می‌توانند توسط سویه مخمر جدید تخمیر شوند. تخمیر این قندها، منجر به افزایش تولید بیواتانول می‌شود. تولید بیواتانول از پسماند مرکبات شامل جمع‌آوری، شستشو، استریل کردن سطح و خشک کردن در آفتاب یا کوره است. سپس پسماند خشک شده آسیاب می‌شوند؛ با آب مقطر مخلوط می‌شوند؛ و استریل می‌شوند. پس از آن، ماده اولیه سرد شده با آنزیم‌هایی مانند سلولازها، همی سلولازها و پکتین برای هیدرولیز آنزیمی مخلوط می‌شود. در ادامه، آنزیم هیدرولیز به دست آمده با استفاده از تک کشت مخمر در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد به مدت ۵ روز تحت تخمیر هوازی قرار می‌گیرد. بعد از آن، از روز ششم تا نهم، تخمیر بی هوازی با استفاده از روش فنی کشت مشترک با مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* و *کاندیدا پاراپسیلوزیس* انجام می‌شود (Girish et al. 2014). بیواتانول تولید شده با این فرآیند، پس از تقطیر، خالص‌سازی می‌شود؛ و برای استفاده بیشتر در نظر گرفته می‌شود (Bhuvaneswari and Sivakumar 2019).

۷-۵-۴ بیواتانول از پسماند میوه خرما

خرما بیشتر در کشورهای حوزه خلیج فارس از جمله مصر، لیبی، الجزایر و پاکستان کشت می‌شود. به طور کلی، خرما در هنگام برداشت، ذخیره‌سازی، حمل و نقل و همچنین در فروشگاه‌های خرده‌فروشی به مقدار زیادی هدر می‌رود. از آنجایی که خرما منبع غنی کربوهیدرات است، پسماند به دست آمده از خرما دارای مقادیر قندهای زیست تخریب پذیر بالایی است؛ و اتانول زیستی را می‌توان با تبدیل زیستی این قندها با استفاده از مخمرها در شرایط بی هوازی تولید کرد (Boulal et al. 2016). تولید بیواتانول از پسماند خرما شامل شستن پسماند، غوطه‌ور کردن آن در بن ماری و له کردن و شستشو با آب است. سپس دانه‌های خرما را برداشته و آسیاب می‌کنند؛ و در بن ماری با دمای ۹۰ تا ۹۵ درجه سانتی‌گراد

قرار می‌دهند؛ تا قند استخراج شود. دمای شیر خرد شده به دست آمده در یک دوره استخراج در حدود ۶۰ درجه سانتیگراد حفظ می‌شود؛ تا از آلودگی شیر جلوگیری شود. پس از هیدرولیز اسید، هیدرولیز به دست آمده با استفاده از کشت مخمر در دمای نزدیک به ۳۲ درجه سانتیگراد به مدت ۷۲ ساعت تخمیر می‌شود؛ و پس از آن بیواتانول تولید شده در معرض تقطیر قرار می‌گیرد. با تکرار این فرآیند حداقل چهار بار، می‌توان بیواتانول با قدرت ۹۰ درصد تولید کرد (Bhuvaneswari and Sivakumar 2019).

۷-۵-۵ بیواتانول از فرآوری پسماند سیب زمینی

یکی دیگر از محصولات که دارای قند مفید برای تولید بیواتانول، سیب زمینی است. محصول سیب زمینی سومین محصول اصلی غذایی است. این محصول، در سرتاسر جهان با ۳۲۵ میلیون تن محصول هر سال کشت می‌شود (Birch et al. 2012). تخمین زده شده است که نزدیک به یک سوم از کل محصول سیب زمینی در جهان «ذخیره ی بیش از نیاز» است. این ذخیره ی سیب زمینی برای تولید ۱۲۰۰ تا ۷۲۰۰ میلیون لیتر بیواتانول در سال کافی است (Tasić and Veljković 2011). به همین ترتیب، تخمین زده می‌شود؛ که تا ۵۰ درصد سیب‌زمینی‌های ناخالص در فرآوری سیب‌زمینی هدر می‌روند. همچنین، در طول رشد آن‌ها، ۵ تا ۲۰ درصد و در صنعت تولید چیپس سیب‌زمینی، ۱۸ درصد سیب‌زمینی هدر می‌رود. در حال حاضر اکثر پسماند تولید شده از صنعت سیب زمینی به عنوان خوراک دام استفاده می‌شود (Radunz et al. 2003). با این حال، نشاسته موجود در فاضلاب پردازش تولید شده از صنعت چیپس سیب زمینی، گلوکز تولید می‌کند. این گلوکز می‌تواند به عنوان یک ماده تشکیل دهنده برای تخمیر باکتریایی برای تولید بیواتانول استفاده شود (Abanoz et al. 2012). یک مطالعه برای بهینه سازی شرایط هیدرولیز برای زباله‌های سیب زمینی جامد تولید شده از تولید پوسته سیب زمینی انجام شد؛ و از محیط بدست آمده برای تخمیر به بیواتانول (حدود ۳۱ گرم در لیتر) از مخمر ساکارومایسس سرویزیه استفاده شد (Izmirlioglu and Demirci 2010). به طور مشابه، مطالعه دیگری ۲۰ گرم در لیتر اتانول را از محیطی حاوی قندهای آزاد شده از پوست سیب زمینی تازه (۱۲ درصد وزنی به وزنی) با استفاده از آنزیم‌هایی از جمله آمیلاز، پکتیناز β -گلوکاناز قارچی استخراج کرد. علاوه بر این، گزارش شد؛ که ترکیب پوره سیب زمینی و پوست سیب زمینی در محیط و استفاده از همان سه آنزیم منجر به افزایش تولید بیواتانول (تا ۵۰ گرم در لیتر) شد (Yamada et al. 2010).

۷-۵-۶ بیواتانول از تفاله قهوه و پوسته

فرآوری قهوه همچنین باقی مانده‌هایی از جمله تفاله قهوه، پوسته و فاضلاب را به همراه دارد. در حال حاضر، تفاله قهوه در رودمنازل و نهرهای محلی ریخته می‌شود. این امر، منجر به اسیدی شدن آب و نابودی آبزیان می‌شود (Seboka et al. 2009). تفاله قهوه منبعی با مقادیر مواد مغذی بالا عمدتاً برای تغذیه حیوانات یا به عنوان کود برای گیاه قهوه استفاده می‌شود. از هر ۲ تن میوه درخت قهوه تقریباً ۱ تن تفاله قهوه تولید می‌شود (Roussos et al. 1995). بر اساس وزن خشک، تفاله قهوه شامل ۸/۲۵ درصد پروتئین و ۲۳ تا ۲۷ درصد قند قابل تخمیر است. هیدرولیز تهیه شده از اسید سولفوریک رقیق شده، حاوی قندهای قابل تخمیر مختلفی مانند آرابینوز (تا ۱۱/۲۶ گرم در لیتر)، گلوکز (تا ۶/۳۱ گرم در لیتر)، ساکارز (تا ۳/۹۶ گرم در لیتر)، مالتوز (تا ۳/۵۰ گرم در لیتر)، زایلوز (تا ۳/۲۳ گرم در لیتر) و فروکتوز (تا ۳ گرم در لیتر) است (Urbaneja et al. 1996). مطالعه‌ای که برای بررسی امکان‌سنجی تولید بیواتانول از تفاله قهوه هیدرولیز شده توسط اسید رقیق یا آب مقطر و تخمیر شده با مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* انجام شد، گزارش داد که برای انجام هیدرولیز، آب مقطر انتخاب بهتر نسبت به اسید رقیق است (Kefale et al. 2012). ۷/۴ گرم در لیتر بیواتانول از هیدرولیز ۴ ساعته از جوشاندن آب مقطر و تخمیر بعدی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد تولید شد. از پردازش ۱ کیلوگرم دانه قهوه حدود ۱ کیلوگرم پوسته قهوه بدست می‌آید. این پوسته قهوه عمدتاً به عنوان خوراک دام و سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد (Franca and Oliveira 2009). مطالعه‌ای برای بررسی تولید بیواتانول با استفاده از پوسته قهوه کامل و آسیاب شده و همچنین عصاره محلول در آب پوسته قهوه آسیاب شده به عنوان پیش‌نیاز و تخمیر با مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* انجام شد. این مطالعه نشان داد که تولید بیواتانول تا ۱۳/۶ گرم در لیتر بود (Gouvea et al. 2009).

۷-۵-۷ بیواتانول از پسماند غلات

دانه‌های غلات دارای مقادیر نشاسته بالایی هستند. این دانه‌ها به عنوان ماده اولیه مناسبی برای تولید سوخت زیستی در نظر گرفته شده است. عمده‌ترین کاربرد صنعتی غلات، جداسازی نشاسته و سپس پردازش است. در بیشتر غلات، حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد ماده خشک را نشاسته تشکیل می‌دهد. نشاسته عمدتاً به صورت صنعتی از گندم و همچنین ذرت و به میزان کمتری از برنج استخراج می‌شود. در سال‌های اخیر، یک روند رو به افزایش در بخش غلات مشاهده شده است. این غلات برای مصرف مستقیم و برای استفاده در صنعت خوراک استفاده

نمی‌شود. بیشتر غلات‌های تولید شده برای تولید بیواتانول به غیر از هدف مصرف و خوراک استفاده می‌شود (Kamani et al. 2019).

۷-۵-۷-۱ محصولات انرژی‌زا

محصولات انرژی‌زا آن دسته از محصولاتی هستند؛ که تولید جزئی یا کل آنها به عنوان ماده خام برای تولید انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. این محصولات در هر واحد سطح و زمان مقدار زیادی زیست توده تولید می‌کنند. ویژگی‌های اصلی برای انتخاب محصولات انرژی‌زا شامل، رشد سریع، یعنی مدت زمان کوتاه از کاشت تا برداشت، توانایی رشد در شرایط آب و هوایی نامناسب و شرایط ضعیف خاک است. در این شرایط، محصولات دیگر ممکن است عملکرد پایین تر و ناسازگار با محیط زیست داشته باشند (Dubois 2011). به طور کلی محصولات انرژی‌زا به دو دسته گیاهان انرژی‌زای علفی و چوبی تقسیم می‌شوند. نوع محصول اول عمدتاً متعلق به علف‌های چند ساله مانند نی بلند (گیاه نی)، گیاه چمن^۱ و علف نقره‌ای^۲ است؛ اما دومی با رشد نسبتاً سریع تر و چرخه کوتاه تر شامل صنوبر و اکالیپتوس است. هر دو نوع محصول ممکن است منجر به کاهش فرسایش خاک، افزایش کربن خاک و حاصلخیزی خاک در خاک‌های ضعیف شود. علاوه بر این، محصولات انرژی‌زای علفی را می‌توان در زمین‌هایی با حاصلخیزی کمتر و ترکیب معدنی ضعیف بدون آسیب رساندن به ویژگی‌های اساسی بیواتانول کشت کرد. گیاه چمن و گونه علف نقره‌ای از گیاهان زراعی انرژی‌زای لیگنوسلولزی هستند. این دو گیاه، بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یک مطالعه تبدیل علف سوئیچ به سوخت زیستی، را پس از استفاده از روش‌های مختلف آماده سازی (هیدروکسید سدیم، اسید سولفوریک و متانول) مورد بررسی قرار داد. در نتیجه، متانول به عنوان روش پیش تصفیه مؤثر و با بازده نهایی ۰/۳۲ گرم اتانول در گرم گلوکز با بازده تبدیل ۹۷ درصد یافت شد (Smullen et al. 2017).

۷-۵-۷-۲ پوسته برنج^۳

پوسته برنج، یک ضایعه از فرآوری مواد غذایی کشاورزی است. پوسته برنج به راحتی و به وفور در دسترس قرار دارد. فرایند آسیاب برنج تقریباً ۷۸ درصد برنج، برنج شکسته و سبوس و ۲۲

1. *Panicum virgatum*

۲. گونه میسکانتوس

۳. شلتوک یا پوسته اولیه برنج است که به وسیله آسیاب‌های سنگی و یا دستگاه‌های خاص کوبیده و جدا می‌شود.

درصد پوسته برنج به دست می‌دهد. پوسته برنج شامل ۵۰ درصد سلولز، ۲۵ تا ۳۰ درصد لیگنین و ۱۵ تا ۲۰ درصد سیلیس است (Nagrale et al. 2012). در چندین کشور تولیدکننده برنج، بخش عمده‌ای از پوسته برنج سوزانده می‌شود؛ یا دفع می‌شود. این عمل، منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود (Eberemu et al. 2011; Krishnarao et al. 2001). از طرف دیگر، پسماند تولید شده در طول برداشت و فرآوری برنج نیز می‌تواند به عنوان خوراک کم هزینه برای تولید بیواتانول استفاده شود. یک مطالعه این نظریه را با پیش تصفیه پوسته برنج با لیمو بررسی کرد؛ سپس با آنزیم‌هایی مانند سلولاز، همیسلولز و β -گلوکوزیداز تصفیه کرد. پوسته برنج با لیمو، ۹/۸ گرم در لیتر بیواتانول با عملکرد ۰/۴۹ گرم در گرم قند موجود پس از تخمیر برای ۱۹ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد با استفاده از سویه باکتری *اکلاسی* FBR5 تولید کرد. علاوه بر این، با استفاده از فرایند ساکارزی کردن همراه با تخمیر برای ۵۳ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد، بازدهی از غلظت بیواتانول حتی بالاتر (۱۱/۰ گرم در لیتر) به دست آمد (Saha and Cotta 2008). مطالعه دیگری تولید بیواتانول را با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* از قندهای آزاد شده از پوسته برنج با استفاده از هیدرولیز اسید تجزیه و تحلیل کرد. هیدرولیز اسیدی بازدارنده‌هایی تولید کرد. این بازدارنده‌ها مانع رشد سلول شد؛ اما بازده بیواتانول را تنها ۴ درصد از حداکثر نظری (از ۰/۴۹ گرم در گرم گلوکز به ۰/۴۷ گرم در گرم گلوکز) کاهش داد (Moon et al. 2012).

۷-۵-۸ لبنیات

اگرچه صنعت لبنیات با مسائل زیست محیطی گسترده ارتباطی نداشته است. با این حال، تعامل آن با محیط زیست همچنان باید در نظر گرفته شود؛ زیرا آلاینده‌های تولید شده از این صنعت عمده‌تأ طبیعی هستند. تولید محصولات لبنی انواع زباله‌های جامد و مایع را همراه با برخی از محصولات جانبی تولید می‌کند. این محصولات جانبی ممکن است شامل محصولات آسیب دیده یا از بین رفته، محصولات غیر مشخص، مواد جامد، پنیر، لجن شیر و آب پنیر شامل پروتئین‌ها، چربی‌ها و لاکتوز باشد؛ بنابراین استفاده مفید از آنها ضروری است (Prazeres et al. 2012).

۷-۵-۸-۱ آب پنیر

آب پنیر، محصول جانبی صنعت پنیر، در مقادیر زیادی تولید می‌شود. در صورت ریختن محصولات جانبی صنعت پنیر در منازل یا زمین‌های کشاورزی می‌تواند منجر به آلودگی محیط زیست شود (Smithers 2008). هر سال در جهان، در حدود ۱۸ میلیون تن پنیر تولید می‌شود.

این تولید پنیر به ایجاد ۱۶۰ میلیون تن آب پنیر به عنوان محصول جانبی می‌شود (Guimarães et al. 2010; Kosikowski 1979). از کل آب پنیر تولید شده، ۷۰ درصد برای تولید محصولات دیگر و تقریباً ۳۰ درصد برای تغذیه خوک‌ها یا به عنوان کود یا توزیع در محیط استفاده می‌شود. پودر آب پنیر یکی از محصولاتی است که از آب پنیر تولید می‌شود. پودر آب پنیر، به عنوان ترکیبی از چندین محصول غذایی برای خوراک انسان و دام مورد استفاده قرار می‌گیرد (Božanić et al. 2014; Guimarães et al. 2010; González Siso 1996). اگرچه آب پنیر اغلب دفع می‌شود؛ اما منبع غنی از مواد مغذی ضروری مانند لاکتوز (۵-۶ درصد)، پروتئین (۱ درصد)، اسید لاکتیک (۰/۸-۰/۱ درصد) و چربی (۰/۰۶ درصد) در آب پنیر وجود دارد (Li and Yang 2016). تحقیقات مختلفی برای بررسی تولید بیواتانول از آب پنیر انجام شده است (Guimarães et al. 2010; Kargi and Ozmihci 2006; Koushki et al. 2012; Zafar and Owais 2006). چندین مطالعه انجام شده در گذشته عملکرد کم بیواتانول از آب پنیر را گزارش کردند. با این حال، تلاش‌هایی برای ارتقای آن در حال انجام است. چالش دیگری که در طول تولید بیواتانول از آب پنیر با آن مواجه است، وجود لاکتوز به عنوان شکلی از قند قابل تخمیر است. لاکتوز شامل گلوکز و گالاکتوز است. مخمر ساکارومایسس سرویزیه، یک تولیدکننده معمولی بیواتانول است. مخمر ساکارومایسس سرویزیه به دلیل عدم وجود آنزیم β -گالاکتوزیداز و همچنین عدم قابلیت انتقال لاکتوز به داخل سلول، قادر به استفاده از لاکتوز نیست (Domingues et al. 2010). از سوی دیگر، مخمرهای دیگری مانند کلویورومیسیس فرجلیس^۱ که با نام‌های دیگری مانند کلویورومیسیس مارکسیانوس^۲، کاندیدا کفیر^۳ یا کاندیدا پسدوتروپیکالز^۴ نیز شناخته می‌شود، قادر به تخمیر لاکتوز هستند. گزارش شده است که باکتری فراژیلیس^۵ در تخمیر لاکتوز تا غلظت اقتصادی ۲۰ درصد، هرچند آهسته، مهارت دارد. علاوه بر این، همچنین باکتری فراژیلیس با وجود غلظت متوسط قند و نمک موجود در آب پنیر، مانع تولید بیواتانول می‌شود؛ و نسبت به مخمر ساکارومایسس سرویزیه، تحمل کمتری به بیواتانول دارد. راه حل دیگر برای این چالش، پیش تصفیه آب پنیر با بتا گالاکتوزیداز به منظور هیدرولیز لاکتوز به گالاکتوز و گلوکز قبل از استفاده از آن به عنوان ماده تشکیل دهنده محیط تخمیر است. در مطالعه ای گزارش شده است، که یک سویه الجزایری مخمر ساکارومایسس سرویزیه تولید کننده اتانول

1. *Kluyveromyces fragilis*

2. *K. marxianus*

3. *Candida kefyr*

4. *C. pseudotropicalis*

5. *K. fragilis*

موثر از آب پنیر پیش هیدرولیز شده با آنزیم بتا گالاکتوزیداز است (Boudjema et al. 2015). با این حال، چالشی که این روش با آن مواجه است را می‌توان به سرکوب کاتابولیت^۱ نسبت داد، زیرا گالاکتوز تنها زمانی تجزیه می‌شود که گلوکز به طور کامل مصرف شود. روشهای دیگر برای غلبه بر این چالش شامل تغییر ژن برای تولید مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* است. این مخمر قادر به استفاده همزمان از گلوکز و گالاکتوز از آب پنیر پیش تصفیه شده است. یک مطالعه نشان داد که تخمیر آب پنیر با مقادیر لاکتوز کم (۳ تا ۵ درصد وزنی به حجمی) پس از تخمیر، بیواتانول (۲ تا ۳ درصد وزنی به وزنی) تولید می‌کند. در همان مطالعه از آب پنیر رقیق (۴/۹ درصد لاکتوز) و آب پنیر غلیظ (۹/۸ درصد لاکتوز) برای مقایسه مخمر *کلویورومیسیس مارکسیانوس* و مخمر *کاندیدا* کفیر برای تولید بیواتانول استفاده شد؛ و تولید تقریباً بیواتانول از آب پنیر غلیظ دو برابر بیشتر نسبت به آب پنیر رقیق (۴/۶-۴/۰ درصد در مقایسه با ۲/۲-۲/۰ درصد) مشاهده شد (Koushki et al. 2012). با این حال، آب پنیر شامل ۵-۶ درصد لاکتوز می‌باشد. و فقط می‌توان ۲-۳ درصد (حجمی به حجمی) بیواتانول از آن تولید کرد. این مقدار از نظر اقتصادی امکان پذیر نیست. این امر به هزینه تقطیر بالای محیط کشت مایع با غلظت کم بیواتانول نسبت داده می‌شود (Guimarães et al. 2010). همچنین مطالعه ای برای بررسی تولید بیواتانول از محلول پودر آب پنیر حاوی لاکتوز ۴/۵ درصد و پودر آب پنیر حاوی لاکتوز ۵/۵ درصد با استفاده از سویه *اشرشیاکلی* FBR5 بدون هیدرولیز آنزیمی انجام شد (Akbas et al. 2014). پودر آب پنیر چه به صورت خشک و چه به صورت محلول دارای مزایای مختلفی نسبت به آب پنیر در تولید بیواتانول است. پودر آب پنیر شامل غلظت بالای لاکتوز می‌باشد. و نگهداری و حمل و نقل آسان آن است (Guo et al. 2010). علاوه بر لاکتوز، آب پنیر همچنین حاوی پروتئین‌ها و ویتامین‌ها است. این ترکیبات، اجزای ضروری محیط مورد نیاز برای تولید بیواتانول هستند (Akbas and Stark 2016).

۷-۶ نتیجه‌گیری

فرآوری پسماند مواد غذایی به مقدار زیادی تولید می‌شود. مدیریت صحیح فرآوری پسماند مواد غذایی ضروری است. این امر از آسیب‌های زیست محیطی که ممکن است از دفع این پسماندها در محل دفن زباله ایجاد شود، جلوگیری می‌کند. چندين روش برای مدیریت فرآوری پسماند مواد غذایی وجود دارد. تولید سوخت زیستی به عنوان بهترین روش برای مبارزه با چالش آلودگی محیطی احتمالی شناخته شده است. علاوه بر این، با افزایش تقاضا برای انرژی،

۱. کاتابولیک، یک فرایند گرمازای درون سلولی است که طی آن مولکول‌های پیچیده به مولکول‌های ساده‌تر تجزیه می‌شوند.

سوخت‌های زیستی به عنوان یک منبع انرژی پاک شناسایی شده‌اند. سوخت‌های زیستی نقش مهمی در حل مسائل مربوط به چالش‌های زیست محیطی، آب و هوایی، اقتصادی و امنیت اجتماعی دارند؛ زیرا استفاده از سوخت‌های فسیلی، که منبع اصلی انرژی است، باعث بروز مسائل زیست محیطی شده است. اتانول زیستی با توجه به طبیعت دوستدار محیط زیست و اثرات منفی کمتر زیست محیطی در مقایسه با سایر سوخت‌ها، به عنوان سوخت زیستی امیدوارکننده شناخته شده است. در طول چند سال گذشته، استفاده از فرآوری پسماندهای مواد غذایی یک زمینه تحقیقاتی جذاب برای چندین محقق در سراسر جهان بوده است؛ زیرا سوخت‌های زیستی تولید شده از این زباله‌ها به عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت‌های معمولی عمل می‌کنند. در نتیجه منجر به کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای مضر انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. بنابراین استفاده از فرآوری پسماند مواد غذایی برای تولید بیواتانول نسبت به سایر فرآیندهای مفید ارزشمند است. در نتیجه، این فصل بر اهمیت پیش‌بینی تحقیقات برای بررسی سایر پسماند غذایی جدید تاکید می‌کند؛ زیرا این پسماند می‌تواند برای تولید اتانول زیستی و علاوه بر این، سایر سوخت‌های زیستی نیز استفاده شوند.

منابع

- Abanoz K, Stark BC, Akbas MY (2012) Enhancement of ethanol production from potato processing wastewater by engineering *Escherichia coli* using *Vitreoscilla haemoglobin*. *Lett Appl Microbiol* 55(6):436–443. <https://doi.org/10.1111/lam.12000>
- Agarwal AK (2007) Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Prog Energy Combust Sci* 33(3):233–271. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
- Akbas MY, Stark BC (2016) Recent trends in bioethanol production from food processing byproducts. *J Ind Microbiol Biotechnol* 43(11):1593–1609. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1821-z>
- Akbas MY, Sar T, Ozcelik B (2014) Improved ethanol production from cheese whey, whey powder, and sugar beet molasses by “*Vitreoscilla hemoglobin* expressing” *Escherichia coli*. *Biosci Biotechnol Biochem* 78:687–694
- Al Azkawi AS, Sivakumar N, Al Bahry S (2018) Bioprocessing of cardboard waste for cellulose production. *Biomass Convers Bioref* 8(3):597–606. <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0309-7>
- Al-Hasan M (2003) Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energ Convers Manage* 44(9):1547–1561. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\) 00166-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02) 00166-8)
- Axelsson L, Franzén M, Ostwald M, Berndes G, Lakshmi G, Ravindranath NH (2012) *Jatropha* cultivation in southern India: assessing farmers’ experiences. *Biofuels Bioprod Biorefin* 6(3):246–256

- Balat M (2011) Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review. *Energy Conversion and Management* 52(2):858–875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
- Bayraktar H (2005) Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines. *Renewable Energy* 30(11):1733–1747. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.01.006>
- Bello RH, Linzmeyer P, Franco CMB, Souza O, Sellin N, Medeiros SHW, Marangoni C (2014) Pervaporation of ethanol produced from banana waste. *Waste Management* 34(8):1501–1509. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.013>
- Bhuvaneshwari M, Sivakumar N (2019) Bioethanol production from fruit and vegetable wastes. In: *Bioprocessing for biomolecules production*, pp 417–427. <https://doi.org/10.1002/9781119434436.ch20>
- Birch PRJ, Bryan G, Fenton B, Gilroy EM, Hein I, Jones JT, Prashar A, Taylor MA, Torrance L, Toth IK (2012) Crops that feed the world 8: potato: are the trends of increased global production sustainable? *Food Security* 4(4):477–508. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0220-1>
- Boudjema K, Fazouane-Naimi F, Hellal A (2015) Optimization of the bioethanol production on sweet cheese whey by *Saccharomyces cerevisiae* DIV13-Z087C0VS using response surface methodology (RSM). *Rom Biotechnol Lett* 20(5):10814–10825
- Boulal A, Kihlhal M, Khelifi C, Benali B (2016) Bioethanol production from date palm fruit waste fermentation using solar energy. *Afr J Biotechnol* 15(30):1621–1627. <https://doi.org/10.5897/ajb2016.15368>
- Božanić R, Barukčić I, Lisak K (2014) Possibilities of whey utilisation. *J Nutr Food Sci* 2(7):1–7
- Cypriano DZ, da Silva LL, Tasic L (2018) High value-added products from the orange juice industry waste. *Waste Management* 79:71–78. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.028>
- Dahiya S, Kumar AN, Shanthi Sravan J, Chatterjee S, Sarkar O, Mohan SV (2018) Food waste biorefinery: sustainable strategy for circular bioeconomy. In: *Bioresource technology*, vol 248. Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.176>
- Dar RA, Yaqoob M, Parmar M, Angad G, Veterinary D, Phutela UG (2019) Biofuels from food processing wastes (issue may). *Material Research Foundation* 46:249–288. <https://doi.org/10.21741/9781644900116-10>
- De Laurentiis V, Corrado S, Sala S (2018) Quantifying household waste of fresh fruit and vegetables in the EU. *Waste Management* 77:238–251. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.001>
- Demirbas A (2008) Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management* 49(8):2106–2116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020>
- Domingues L, Guimarães PMR, Oliveira C (2010) Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for lactose/whey fermentation. *Bioengineering Bugs* 1(3):164–171. <https://doi.org/10.4161/bbug.1.3.10619>
- Dubois JL (2011) Requirements for the development of a bioeconomy for chemicals. *Curr Opin Environ Sustain* 3(1–2):11–14. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.02.001>

- Dudley R (2004) Ethanol, fruit ripening, and the historical origins of human alcoholism in primate frugivory. *Integr Comp Biol* 44(4):315–323. <https://doi.org/10.1093/icb/44.4.315>
- Eberemu A, Amadi A, Sule J (2011) Desiccation effect on compacted tropical clay treated with rice husk ash. *GeoFrontiers*:1192–1201
- Escobar JC, Lora ES, Venturini OJ, Yáñez EE, Castillo EF, Almazan O (2009) Biofuels: environment, technology and food security. *Renew Sustain Energy Rev* 13(6–7):1275–1287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.014>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2013a) International year of the potato 2008. <http://www.potato2008.org>. Accessed 2 Feb 2016
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2013b) Food wastage footprint. FAO, Rome. <http://www.fao.org/publications>
- Franca AS, Oliveira LS (2009) Coffee processing solid wastes: current uses and future perspectives. In: *Agricultural wastes*. (issue January 2009)
- Gavahian M, Munekata PES, Eş I, Lorenzo JM, Mousavi Khaneghah A, Barba FJ (2019) Emerging techniques in bioethanol production: from distillation to waste valorization. *Green Chem* 21(6): 1171–1185. <https://doi.org/10.1039/c8gc02698j>
- Gebregergs A, Gebresemati M, Sahu O (2016) Industrial ethanol from banana peels for developing countries: response surface methodology. *Pac Sci Rev A Nat Sci Eng* 18(1):22–29. <https://doi.org/10.1016/j.pusra.2016.06.002>
- Girish V, Kumar KR, Girisha ST (2014) Estimation of sugar and bio ethanol from different decaying fruits extract. *Adv Appl Sci Res* 5(1):106–110
- Giroto F, Alibardi L, Cossu R (2015) Food waste generation and industrial uses: a review. *Waste Manag* 45:32–41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.008>
- González Siso MI (1996) The biotechnological utilization of cheese whey: a review. *Bioresour Technol* 57(1):1–11. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00036-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00036-3)
- Gosavi P, Chaudhary Y, Durve-Gupta A (2017) Production of biofuel from fruits and vegetable wastes. *Eur J Biotechnol Biosci* 5(3):2321–9122
- Gouvea BM, Torres C, Franca AS, Oliveira LS, Oliveira ES (2009) Feasibility of ethanol production from coffee husks. *Biotechnol Lett* 31(9):1315–1319. <https://doi.org/10.1007/s10529-009-0023-4>
- Guerrero AB, Muñoz E (2018) Life cycle assessment of second generation ethanol derived from banana agricultural waste: environmental impacts and energy balance. *J Clean Prod* 174:710–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.298>
- Guimarães PMR, Teixeira JA, Domingues L (2010) Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey. *Biotechnol Adv* 28(3): 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.02.002>
- Guo X, Zhou J, Xiao D (2010) Improved ethanol production by mixed immobilized cells of *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* from cheese whey powder solution fermentation. *Appl Biochem Biotechnol* 160(2):532–538. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8412-z>
- Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, Otterdijk R, Meybeck A (2011) Global food losses and food waste. Extent, causes and prevention. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

- Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, Emanuelsson A (2013) The methodology of the FOA study: global food losses and food waste-extent, causes and prevention. The Swedish Institute for Food and Biotechnology, Gothenburg
- Hossain ABMS, Ahmed SA, Alshammari AM, Adnan FMA, Annur MSM, Mustafa H, Hammad N (2011) Bioethanol fuel production from rotten banana as an environmental waste management and sustainable energy. *Afr J Microbiol Res* 5(6):586–598. <https://doi.org/10.5897/AJMR10.231>
- Izmirliglu G, Demirci A (2010) Ethanol production from waste potato mash by using *Saccharomyces cerevisiae*. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010, vol 2, pp 1571–1581. <https://doi.org/10.3390/app2040738>
- Kamani MH, Eş I, Lorenzo JM, Remize F, Roselló-Soto E, Barba FJ, Clark J, Mousavi Khaneghah A (2019) Advances in plant materials, food by-products, and algae conversion into biofuels: use of environmentally friendly technologies. *Green Chem* 21(12):3213–3231. <https://doi.org/10.1039/c8gc03860k>
- Kargi F, Ozmihci S (2006) Utilization of cheese whey powder (CWP) for ethanol fermentations: effects of operating parameters. *Enzyme Microb Technol* 38(5):711–718. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.11.006>
- Kefale A, Redi M, Asfaw A (2012) Potential of bioethanol production and optimization test from agricultural waste: the case of wet coffee processing waste (pulp). *Int J Renew Energy Res* 2(3): 446–450. <https://doi.org/10.20508/ijrer.79608>
- Kim S, Dale BE (2005) Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: bioethanol and biodiesel. *Biomass Bioenergy* 29(6):426–439. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.06.004>
- Kiran EU, Trzcinski AP, Ng WJ, Liu Y (2014) Bioconversion of food waste to energy: a review. *Fuel* 134:389–399. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.074>
- Kosikowski FV (1979) Whey utilization and whey products. *J Dairy Sci* 62(7):1149–1160. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(79\)83389-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(79)83389-5)
- Koushki M, Jafari M, Azizi M (2012) Comparison of ethanol production from cheese whey permeate by two yeast strains. *J Food Sci Technol* 49(5):614–619. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0309-0>
- Krishnarao RV, Subrahmanyam J, Kumar TJ (2001) Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. *J Eur Ceram Soc* 21:99
- Li S, Yang X (2016) Biofuel production from food wastes. In: Handbook of biofuels production: processes and technologies, 2nd edn (Issue December 2016). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00020-5>
- Lin CSK, Pfaltzgraff LA, Herrero-Davila L, Mubofu EB, Abderrahim S, Clark JH, Koutinas AA, Kopsahelis N, Stamatelatos K, Dickson F, Thankappan S, Mohamed Z, Brocklesby R, Luque R (2013) Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energ Environ Sci* 6(2):426–464. <https://doi.org/10.1039/c2ee23440h>
- Lynd LR (1996) Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: technology, economics, the environment, and policy. *Annu Rev Energy Environ* 21(1):403–465. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.21.1.403>

- Ministry of Food Processing Industries (2015) Annual Report 2016–17. <http://mofpi.nic.in/documents/reports/annual-report>. Accessed 24 Aug 2018
- Moon HC, Jeong HR, Kim DH (2012) Bioethanol production from acid-pretreated rice hull. *Asia Pac J Chem Eng* 7:206–211
- Mousdale DM (2008) Biofuels: biotechnology, chemistry and sustainable development. CRC, Boca Raton, FL
- Nagrle SD, Hajare H, Modak PR (2012) Utilization of Rice husk ash. *Int J Eng Res Appl* 2(4):1–5
- Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK (2010) Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev* 14(2):578–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Open Working Group on Sustainable Development (2015) Sustainable development goals and targets. United Nations, New York
- Panda SK, Ray RC, Mishra SS, Kayitesi E (2018) Microbial processing of fruit and vegetable wastes into potential biocommodities: a review. *Crit Rev Biotechnol* 38(1):1–16. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1311295>
- Pleissner D, Lam WC, Sun Z, Lin CSK (2013) Food waste as nutrient source in heterotrophic microalgae cultivation. *Bioresour Technol* 137:139–146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.088>
- Prazeres AR, Carvalho F, Rivas J (2012) Cheese whey management: a review. *J Environ Manage* 110:48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- Radunz AE, Lardy GP, Bauer ML, Marchello MJ, Loe ER, Berg PT (2003) Influence of steampeeled potato-processing waste inclusion level in beef finishing diets: effects on digestion, feedlot performance, and meat quality. *J Anim Sci* 81(11):2675–2685. <https://doi.org/10.2527/2003.81112675x>
- Ramírez de la Piscina P, Homs N (2008) Use of biofuels to produce hydrogen (reformation processes). *Chem Soc Rev* 37(11):2459–2467. <https://doi.org/10.1039/b712181b>
- Ricardo Soccol C, Faraco V, Karp S, Vandenberghe LPS, Thomaz-Soccol V, Woiciechowski A, Pandey A (2011) Lignocellulosic bioethanol: current status and future perspectives. In: *Biofuels*, 1st edn. Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00005-X>
- Roussos S, de los Angeles Aquíhuatl M, del Refugio Trejo-Hernández M, Gaime Perraud I, Favela E, Ramakrishna M, Raimbault M, Viniegra-González G (1995) Biotechnological management of coffee pulp - isolation, screening, characterization, selection of caffeine-degrading fungi and natural microflora present in coffee pulp and husk. *Appl Microbiol Biotechnol* 42(5): 756–762. <https://doi.org/10.1007/BF00171958>
- Saha BC, Cotta MA (2008) Lime pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of rice hulls to ethanol. *Biomass Bioenergy* 32(10):971–977. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.014>
- Sarkar N, Ghosh SK, Bannerjee S, Aikat K (2012) Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renew Energy* 37(1):19–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>
- Schubert C (2006) Can biofuels finally take center stage? *Nat Biotechnol* 24(7):777–784. <https://doi.org/10.1038/nbt0706-777>

- Seboka Y, Getahun MA, Haile-meskel Y (2009) United Nations Development Programme biomass energy for cement production: opportunities in Ethiopia: United Nations Development Program, p 77
- Shah YR, Sen DJ (2011) Bioalcohol as green energy - a review. *Int J Curr Sci Res* 1(2):57–62. <http://cogprints.org/7310/>
- Shehu I, Akanbi TO, Wyatt V, Aryee ANA (2019) Fruit, nut, cereal, and vegetable waste valorization to produce biofuel. In: *Byproducts from agriculture and fisheries*, pp 665–684. <https://doi.org/10.1002/9781119383956.ch30>
- Shigechi H, Koh J, Fujita Y, Matsumoto T, Bito Y, Ueda M, Satoh E, Fukuda H, Kondo A (2004) Direct production of ethanol from raw corn starch via fermentation by use of a novel surfaceengineered yeast strain codisplaying glucoamylase and α -amylase. *Appl Environ Microbiol* 70(8):5037–5040. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.8.5037-5040.2004>
- Smithers GW (2008) Whey and whey proteins-From “gutter-to-gold.”. *Int Dairy J* 18(7):695–704. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>
- Smullen E, Finnan J, Dowling D, Mulcahy P (2017) Bioconversion of switchgrass: identification of a leading pretreatment option based on yield, cost and environmental impact. *Renew Energy* 111:638–645. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.059>
- Tasić MB, Veljković VB (2011) Simulation of fuel ethanol production from potato tubers. *Comput Chem Eng* 35(11):2284–2293. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.11.003>
- Tock JY, Lai CL, Lee KT, Tan KT, Bhatia S (2010) Banana biomass as potential renewable energy resource: a Malaysian case study. *Renew Sustain Energy Rev* 14(2):798–805. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.010>
- Tuck CO, Pérez E, Horváth IT, Sheldon RA, Poliakoff M (2012) Valorization of biomass: deriving more value from waste. *Science* 337(6095):695–699. <https://doi.org/10.1126/science.1218930>
- United Nations Industrial Development Organization (2012) Food waste. http://www.unido.org/fileadmin/import/32068_35FoodWastes
- Urbaneja G, Ferrer J, Paez G, Arenas L, Colina G (1996) Acid hydrolysis and carbohydrates characterization of coffee pulp. *Renew Energy* 9(1–4 SPEC):1041–1044. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88458-8](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88458-8)
- Waldron K (2007) *Handbook of waste management and co-product recovery in food processing*, 1st edn. Woodhead Publishing, Cambridge
- Weldemichael Y, Assefa G (2016) Assessing the energy production and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation potential of biomass resources for Alberta. *J Clean Prod* 112:4257–4264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.118>
- Woiciechowski AL, Medeiros ABP, Rodrigues C, de Souza Vandenberghe LP, de Andrade Tanobe VO, Dall’Agnol A, Gazzoni DL, Soccol CR (2016) Feedstocks for biofuels. In: *Green energy and technology*, pp 15–39. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30205-8_2
- Wu Y, Wang C, Zheng M, Zuo J, Wu J, Wang K, Yang B (2017) Effect of pH on ethanol-type acidogenic fermentation of fruit and vegetable waste. *Waste Manag* 60:158–163. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.033>

- Yamada S, Shinomiya N, Ohba K, Sekikawa M, Oda Y (2010) Enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of by-products from potato processing plants. *Food Sci Technol Res* 15(6): 653–658. <https://doi.org/10.3136/fstr.15.653>
- Yüksel F, Yüksel B (2004) The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine. *Renew Energy* 29(7):1181–1191. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.11.012>
- Zabed H, Sahu JN, Boyce AN, Faruq G (2016) Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renew Sustain Energy Rev* 66:751–774. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.038>
- Zafar S, Owais M (2006) Ethanol production from crude whey by *Kluyveromyces marxianus*. *Biochem Eng J* 27(3):295–298. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.05.009>
- Zorya S, Morgan N, Rios LD, Hodges R, Bennett B (2011) Missing food: the case of postharvest grain losses in sub-Saharan Africa. The World Bank, Washington, DC



استفاده از پسماند میوه و سبزیجات به عنوان مواد اولیه لیگنوسلولزی برای تخمیر بیواتانول

چکیده: پسماند مواد غذایی چالشی برای محیط زیست در سراسر جهان است. بنابراین استفاده مجدد از پسماند مواد غذایی لازم است. مواد اولیه پسماند میوه و سبزیجات یک منبع سازگار با محیط زیست هستند. این منابع پتانسیل قابل توجهی برای تولید برق، بیوگاز و حلال‌های شیمیایی دارند. اتانول زیستی مشتق شده از زیست توده ۱۰ تا ۱۵ درصد از منابع انرژی جهانی را تشکیل می‌دهد؛ و کمبود سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تمام شدن سوخت‌های فسیلی را برطرف می‌کند. در حال حاضر، بیواتانول یک موضوع جهانی مهم برای کاهش آلودگی هوا است. باقی مانده میوه‌ها و سبزیجات حاوی مقادیر زیادی کربوهیدرات‌های ساده و پیچیده هستند؛ و از این قندها می‌توان به عنوان ماده خام و تازه برای تولید بیواتانول با استفاده از کشت میکروبی استفاده کرد. در حال حاضر ۸۰ درصد اتانول زیستی از مواد غذایی مانند قند و نشاسته تولید می‌شود. اخیراً زیست توده لیگنوسلولزی توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. هدف این فصل توضیح فرآیندهای مرتبط با آماده سازی و تخمیر زیست توده پسماند میوه‌ها و سبزیجات است. این فصل همچنین شرایط تخمیر را که بر تخمیر، کشت میکروبی و عملکرد اتانول تأثیر می‌گذارد، مورد بحث قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بیواتانول، حلال، سوخت زیستی، پسماند میوه، پسماند گیاهی، تخمیر

اختصارات

(NH ₄) ₂ SO ₄	سولفات آمونیوم
Ca(OH) ₂	هیدروکسید کلسیم
CO	مونواکسید کربن
CO ₂	دی اکسید کربن
COD	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی
FVW	پسماند میوه و سبزیجات
GHG	گاز گلخانه ای
KH ₂ PO ₄	پتاسیم دی هیدروژن فسفات
KOH	هیدروکسید پتاسیم
NaOH	هیدروکسید سدیم
NH ₃	آمونیاک
SHF	هیدرولیز و تخمیر جداگانه
SSCF	ساکارزی کردن و تخمیر مشترک همزمان
SSF	ساکارزی کردن و تخمیر همزمان

۸-۱ مقدمه

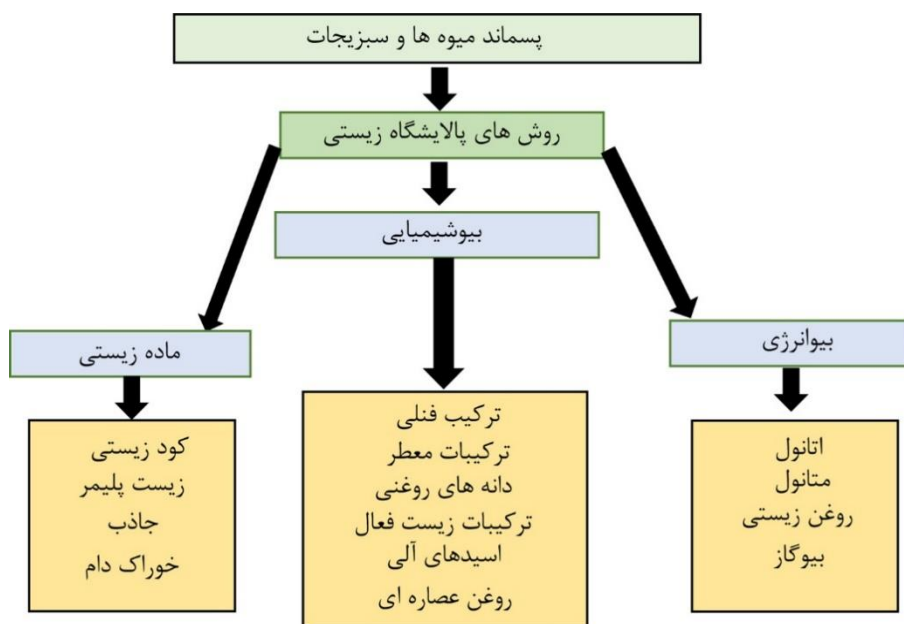
افزایش تقاضا و تمام شدن سریع سوخت‌های معمولی، نیاز به انرژی سازگار با محیط زیست جایگزین را افزایش می‌دهد. این جایگزینی باید به سرعت انجام شود. (Allen 2017). در صورتی که نفت تمام شود، انتشار مستقیمی از نفت به هوا صورت نمی‌گیرد. اما، در فرآیندهای استخراج، حمل و نقل، ذخیره سازی و استفاده از نفت، دی اکسید کربن و مونواکسید کربن در هوا منتشر می‌شود (Uzair Ali et al. 2020). آلودگی هوا، اثر گلخانه‌ای و گرم شدن کره زمین اثرات قابل توجهی از مصرف سوخت نامحدود است؛ و وضعیت زمین را نگران می‌کند (Uzair Ali et al. 2020). در حال حاضر، نیاز به انرژی در جهان بر اساس سوخت‌های فسیلی است. سوخت‌های فسیلی نمی‌توانند نیازهای انرژی آینده را تأمین کنند. کاهش مداوم مخزن سوخت فسیلی باعث افزایش قیمت آن و نیاز به منابع جایگزین جدید نفت در آینده می‌شود. بنابراین نگرانی‌های زیست محیطی فرصت‌های زیادی را به وجود می‌آورد؛ و بازار قابل توجهی برای سوخت زیستی ایجاد می‌کند. نگرانی‌های مربوط به تغییرات اقلیمی نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشویق تقاضای بیواتانول برای جایگزینی سوخت‌های معمولی را ایجاد می‌کند (Arto et al. 2016). یکی دیگر از مشکلات، افزایش پیوسته تخلیه زباله در یک

فضای باز است. تخلیه زباله در فضای باز، به زیستگاه طبیعی و محیط اطراف محل دفن زباله آسیب می‌رساند (Esparza et al. 2020). تولید انرژی از پسماندها یک راه مقرون به صرفه و کارآمد است. طیف گسترده‌ای از منابع و فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر از جمله گازهای زیستی، زیست توده جامد و سوخت‌های مایع در دسترس است. سوخت زیستی یک سوخت تولید شده از زیست توده است. سوخت زیستی شامل چندین پردازش بیوشیمیایی است؛ و از فرآیندهای زمین‌شناسی مانند سوخت‌های فسیلی نشأت نمی‌گیرد. زیست توده با کربوهیدرات‌های پیچیده یا ساده تحت تاثیر برخی آماده سازی قرار می‌گیرد. سپس به برخی از ساکاریدهای محلول تبدیل می‌شود که برای تولید بیواتانول استفاده می‌شود (Demirbas 2007; Hafid et al. 2017). زیست توده به دو دسته اصلی زیست توده نشاسته ای (شکر و سایر محصولات شکر، محصولات جانبی کارخانجات قند) و مواد اولیه لیگنوسلولزی (زباله کشاورزی) طبقه بندی می‌شود. پیش از این، سوخت‌های زیستی نسل اول استفاده از زیست توده نشاسته ای زیادی مانند نیشکر، ذرت و سیب زمینی را برای تولید بیواتانول گزارش کرده بودند. اما، استفاده از این محصولات خوراکی، موانع اقتصادی و اجتماعی-اخلاقی دارد. در حال حاضر، سوخت‌های زیستی نسل دوم توجه بیشتری به استفاده از زیست توده باقی مانده برای تولید بیواتانول دارند. مواد اولیه لیگنوسلولزی شامل باقی مانده‌های محصولات کشاورزی مانند تفاله، ساقه، ساقه ذرت، کاه، برگ و گیاه چمن برای سوخت‌های زیستی نسل دوم است. هر زیست توده پسماند کشاورزی با مقدار قابل توجهی ساکارید می‌تواند به عنوان ماده خام برای تولید بیواتانول استفاده شود. آناناس، سیب زمینی و نیشکر منابع گیاهی قابل توجهی هستند. این منابع گیاهی، به دلیل مقدار زیادی ساکارید در آن منجر به عملکرد مناسب بیواتانول به عنوان محصولات جانبی می‌شوند. بیواتانول، یک جایگزین زیستی برای سوخت موتورهای فعلی است. بیواتانول دارای درجه عدد اکتان بهتر است و فرآیندهای تولید قابل اعتماد و سازگاری آسانی دارد (Bhuvaneswari and Sivakumar 2019).

۸-۱-۱ پسماند میوه و سبزیجات به عنوان ماده خام برای تولید بیواتانول

بخش فرآوری مواد غذایی و تغذیه ارتباط ضروری بین کشاورزی و صنعت ایجاد می‌کند. فرآیندهای فرآوری میوه‌ها و آب میوه در صنایع غذایی، موجب تولید زیاد پوست میوه به عنوان پسماند می‌شود. اکثر میوه‌ها حاوی ۱۵ تا ۵۰ درصد پوست هستند. پس از مصرف لایه میانی میوه (قسمت گوشتی)، پوست به عنوان پسماند دور ریخته می‌شود. برای چندین واحد تولیدی، مقدار پسماند تولید شده، بیشتر از محصول به دست آمده است (Alarcón García et al.).

آینده، اکثر ترکیبات شیمیایی آلی از طریق فرآوری زیستی با استفاده از مواد اولیه کشاورزی، جنگل‌داری، شهری و پسماند مواد غذایی تولید شود (Gnansounou and Pandey 2016). میوه‌های تازه یا آبمیوه عمدتاً به صورت آماده مصرف یا شربت قابل استفاده هستند. بسیاری از مطالعات بیان کردند که زیست توده پسماند میوه و سبزیجات غنی از کربوهیدرات است. ساکاریدها یکی از پیش نیازهای بالقوه برای تولید انرژی سازگار با محیط زیست هستند. تحقیقات در مورد استفاده از زیست توده پسماند میوه و سبزیجات برای تولید سوخت زیستی توجه زیادی را در کشورهای مختلف به خود جلب کرد. پسماند گیاهی می‌تواند قسمت‌های تازه یا پخته شده باشد. این پسماند در طی کشت، برداشت، ذخیره سازی، بازاریابی و مصرف ایجاد می‌شود. سبزیجات فاسد و پوست سبزیجات، پسماند زیست تخریب‌پذیری هستند. این پسماند روزانه در مقادیر زیادی تولید می‌شوند و معمولاً در فضای باز حیاط منزل یا محل‌های دفن زباله تلنبار می‌شوند. این عمل باعث انتشار بوی نامطبوعی می‌شود؛ و ممکن است خوک‌ها، جوندگان و یا جانورلاشخور را به خود جذب کند؛ و به احتمال زیاد باعث انتقال بیماری‌های مختلف انسانی شود. زیست توده پسماند میوه و سبزیجات به محل‌های دفن زباله، تلنبار می‌شود. در این شرایط، زباله‌های زیستی بوی نامطبوعی را منتشر می‌کنند و موجب تولید متان (یک گاز گلخانه‌ای) می‌شوند. علاوه بر این، مقدار زیادی شیرابه خطرناک و آلوده کننده، خاک و آب زیرزمینی را آلوده می‌کنند. هنگامی که در مورد مدیریت زباله صحبت می‌کنیم، سلسله مراتبی وجود دارد: (۱) کاهش یا استفاده مجدد زباله، (۲) بازیافت، (۳) بازیافت انرژی یا کمپوست سازی، و (۴) تصفیه و دفع. استفاده از یک روش مدیریت پسماند مشابه برای پوست میوه و سبزیجات، اما با یک رویکرد متفاوت از تصفیه زیستی، می‌تواند به عنوان یک راهکار مفید برای بهره‌برداری از پسماند میوه و سبزیجات به عنوان منابع قابل استفاده در نظر گرفته شود. استفاده از روش پالایشگاه زیستی برای پسماند میوه و سبزیجات، به دلیل مقرون به صرفه بودن آن، می‌تواند منجر به تولید محصولات متنوع با حجم بالا و کم ارزش مانند خوراک دام و کمپوست شود. همچنین، این روش می‌تواند منجر به تولید ترکیبات کم حجم با ارزش بالا مانند پکتین، اسانس‌ها، ترکیبات فنلی و سایر مواد مفید شود (Joglekar et al. 2019). شکل ۸-۱ شکل کلی یک روش پالایشگاه زیستی برای پردازش پسماند میوه و سبزیجات را نشان می‌دهد. می‌توان پسماند میوه و سبزیجات را به صورت تازه (حاوی رطوبت) یا خشک شده به صورت مستقیم یا با کاهش اندازه مناسب استفاده کرد. براساس انواع مختلف مواد اولیه پسماند میوه و سبزیجات، روش‌های مختلف استخراج با حلال برای تولید ترکیبات فنلی (آنتی اکسیدان‌ها) انتخاب می‌شوند؛ اما پردازش با بخار بیشتر برای استخراج اسانس انجام می‌شود.



شکل ۸-۱. شکل کلی روش پالایشگاه زیستی برای پردازش پسماند میوه و سبزیجات

زیست توده لیگنوسلولزی باقیمانده در محلول اسیدی آبی برای تبدیل آن به ساکاریدهای ساده (قند احیا کننده) نگهداری می‌شود. مرحله هیدرولیز برای افزایش تخمیر و عملکرد محصولات مهم است. باقی مانده مواد هیدرولیز شده جامد پس از صاف سازی می‌تواند برای فرآیند هضم بی‌هوازی یا گازسازی برای به دست آوردن بیوگاز و تولید گاز سنتز (مخلوطی از گاز هیدروژن و کربن مونوکسید) استفاده شود؛ در حالی که فرآیند تخمیر با استفاده از هیدرولیز مایع صاف شده انجام می‌شود. محصولات تخمیر برای به دست آوردن اتانول خالص به ستون تقطیر منتقل می‌شوند (Joglekar et al. 2019). پس از استخراج آب میوه، قسمت‌های باقی‌مانده میوه‌ها منبع غنی لیگنوسلولز هستند؛ و می‌توان از آنها به عنوان پیش نیاز تازه برای تخمیر بیواتانول استفاده کرد (Bhuvaneswari and Sivakumar 2019). در یک مطالعه، پوست موز، آناناس و موزسبز برای فرآیندهای ساکارزی کردن و تخمیر همزمان در دماهای مختلف (۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد) توسط کشت مشترک مخمر *Saccharomyces cerevisiae* و *Aspergillus* نیچر به مدت یک هفته استفاده شد (Itelima et al. 2013). مشخص شد که بالاترین pH و دما برای تخمیر پوست موز ۶ و ۳۰ درجه سانتیگراد بود. بازده بیواتانول بهینه برای پوست موزسبز، موز و آناناس به ترتیب ۳/۹۸ درصد، ۷/۴۵ درصد و ۸/۳۴ درصد حجمی به حجمی بود (Itelima et al. 2013). پسماندهای پوست مرکبات می‌توانند به عنوان ماده اولیه برای

تولید بیواتانول استفاده شوند و موثرترین شرایط برای تخمیر بیواتانول از این پسماندها مشاهده شد (Patsalou et al. 2019). مخمر *پیشیا کودریا زویوی* KVMP10^۱ در دمای ۴۲ درجه سانتیگراد منجر به حداکثر تولید بیواتانول ۳۰/۷ گرم در لیتر می‌شود (Patsalou et al. 2019). پوست آناناس به عنوان یک ماده خام ارزان و مقرون به صرفه برای تخمیر بیواتانول توسط مخمر *ساکاروما یسس سرویزیه* مورد استفاده قرار گرفت (Casabar et al. 2019). هیدروکسید سدیم در آماده سازی پوست آناناس برای تولید بالای ساکاریدهای ساده استفاده شد. افزودن سلول‌های مخمر *تریکودرما هارزیا نوم*^۲ به محیط برای فرآیند هیدرولیز مورد استفاده قرار گرفت. این سلول‌ها می‌تواند به طور موثر مقادیر قند کاهنده پوست آناناس را پس از هیدرولیز افزایش دهد (Casabar et al. 2019). حداکثر تولید اتانول به دست آمده ۵/۹۸ گرم در لیتر (در ۴۸ ساعت افزودن سلول‌های میکروبی به محیط) بود؛ سپس ۵/۳۱ گرم در لیتر (در ۲۴ ساعت) و ۴/۵ گرم در لیتر (در ۷۲ ساعت) تخمیر انجام شد. جدول ۱-۸ استفاده از زیست توده پسماند میوه و سبزیجات را برای تولید بیواتانول گزارش می‌کند. پرومو و همکارانش (2018) گزارش دادند که زباله‌های گیاهی دارای مقادیر بالایی از لیگنوسلولز هستند. آنها از زباله‌های گیاهی غیرخوراکی استفاده می‌کنند و این زباله‌ها را هیدرولیز کرده و گزیلوز و گلوکز را جدا کردند (Promon et al. 2018). لیگنوسلولز عمدتاً از ترکیب ۱۵-۱۰ درصد لیگنین، ۴۰-۲۰ درصد همی سلولز و ۵۰-۳۰ درصد سلولز تشکیل شده است (Wilson and Lee 2014).

سلولز یک پلیمر گلوکز همسان است که با پیوند گلیکوزیدی بتا-۱،۴ به هم متصل است (Zhao et al. 2011).

۸-۱-۲ نقش میکروارگانیسم‌ها

تولید بیواتانول از زیست توده پسماند میوه و سبزیجات شامل چندین مرحله شامل آماده سازی زیست توده زباله، ساکارزی کردن لیگنوسلولز با استفاده از واکنش آنزیمی و در نهایت تخمیر است. هر مرحله به نوعی با مشارکت چندین مرحله میکروبی ارتباط دارد. زیست توده لیگنوسلولزی معمولاً بافت سفت و سختی دارد. این زیست توده از سلولز، لیگنین و همی سلولز تشکیل شده است؛ و باعث می‌شود مواد اولیه خام برای هضم کامل آنزیمی غیرقابل کنترل باشند (Zhao et al. 2011). اما، هزینه آنزیم سلولاز باعث محدودیت در تبدیل تجاری پسماند لیگنوسلولزی می‌شود.

1. *Pichia kudriavzevii* KVMP10
2. *T. harzianum*

جدول ۸-۱. زیست توده پسماند میوه و سبزیجات مورد استفاده برای تولید بیواتانول

منابع	بازده/غلظت اتانول	میکروارگانیزم	آماده سازی	مواد اولیه زیست توده
Poe et al. (2020)	۰/۸ ± ۰/۰ گرم در ۱۰۰ گرم ضایعات	باکتری کلستریدیوم بایجریکنی P260	-	کلم سبز
Poe et al. (2020)	۰/۱ ± ۰/۰ گرم در ۱۰۰ گرم ضایعات	باکتری کلستریدیوم بایجریکنی P260	-	پوست پیاز قرمز
Poe et al. (2020)	۰/۹ ± ۰/۲ گرم در ۱۰۰ گرم ضایعات	باکتری کلستریدیوم بایجریکنی P260	-	لفل دلمه ای قرمز اسبز
Poe et al. (2020)	۱/۰ ± ۰/۰ گرم در ۱۰۰ گرم ضایعات	باکتری کلستریدیوم بایجریکنی P260	-	سیب زمینی
Poe et al. (2020)	۱/۲ ± ۰/۰ گرم در ۱۰۰ گرم ضایعات	باکتری کلستریدیوم بایجریکنی P260	-	سیب زمینی فاسد
Poe et al. (2020)	۰/۷ ± ۰/۰ گرم در ۱۰۰ گرم ضایعات	باکتری کلستریدیوم بایجریکنی P260	-	گوجه فرنگی
Wu et al. (2017)	۶/۷ گرم در لیتر	مشارکت مخلوط بی‌هوازی از لجن	-	ضایعات میوه و سبزیجات شبیه سازی شده
Sarkar et al. (2019)	۰/۳۰ گرم در گرم	سیتروباکتر گونه E4	-	ضایعات میوه
Karimi and Karimi (2018)	۷۵/۹ درصد	قارچ موکور /یندیکوس	۰/۰۵ مولار اسید سولفوریک در دما ۱۸۰-۱۲۰ درجه سانتیگراد	ضایعات آشپزخانه و باغ نسبت (۳:۱)
Chniti et al. (2014)	۳۸/۰ ± ۰/۵ درصد	مخمر ساکارومایسس سرویزیه	-	تفاله خرما
Chniti et al. (2014)	۳۴/۰ ± ۰/۲ درصد	مخمر کاندیدا پلیکولوسا	-	تفاله خرما
Chniti et al. (2014)	۲۹/۰ ± ۰/۱ درصد	مخمر زایگوساکارومایسس روکسی	-	تفاله خرما
Santi et al. (2014)	۰/۴۹۵ گرم در گرم	مخمر ساکارومایسس سرویزیه F15	فرآیند بخار تحت فشار در اثر کاتالیز اسیدی و ساکارزی کردن آنزیمی	ضایعات پوست پرتقال

منابع	بازده/غلظت اتانول	میکروارگانیزم	آماده سازی	مواد اولیه زیست توده
Aung et al. (2017)	۴۹/۷۸ درصد (حجمی به حجمی)	مخمر ساکارومایسس سرویزیه	-	ضایعات آناناس
Utama et al. (2019)	۷/۳۸ درصد (وزنی به وزنی)	مخمر کاندیدا/کروزی و هانسئولا گیلیروندی	-	ضایعات موز
Utama et al. (2019)	۳/۷۴ درصد (حجمی به حجمی)	مخمرهای بومی جدا شده	-	ضایعات خربزه درختی
Utama et al. (2019)	۱/۱۸ درصد (حجمی به حجمی)	مخمرهای بومی جدا شده	-	ضایعات کلم ناپا ^۱
Malik (2019)	۳/۹ درصد (حجمی به حجمی)	مخمر ساکارومایسس سرویزیه و گونه کاندیدا	هیدرولیز آنزیمی سلولاز	ضایعات کاه برنج و پوست میوه خرمالوی هندی
De Oliveira et al. (2021)	۰/۱۳ ± ۰/۱۲ گرم بر هر گرم ضایعات	مخمر ساکارومایسس سرویزیه	آماده سازی اسیدی و سپس هیدرولیز آنزیمی	تفاله گیلان
De Oliveira et al. (2021)	۰/۲۱ ± ۰/۱۲ گرم بر هر گرم ضایعات	مخمر ساکارومایسس سرویزیه	آماده سازی اسیدی و سپس هیدرولیز آنزیمی	پوست میوه پوپونا ^۲
De Oliveira et al. (2021)	۰/۰۷ ± ۰/۱۵ گرم بر هر گرم ضایعات	مخمر ساکارومایسس سرویزیه	آماده سازی اسیدی و سپس هیدرولیز آنزیمی	پوست انبه
De Oliveira et al. (2021)	۰/۰۷ ± ۰/۱۱ گرم بر هر گرم ضایعات	مخمر ساکارومایسس سرویزیه	آماده سازی اسیدی و سپس هیدرولیز آنزیمی	خوشه میوه پوپونا

قارچ‌ها نسبت به باکتری‌ها تولیدکننده‌های اصلی آنزیم سلولاز در میان منابع میکروبی مختلف هستند. گونه قارچ *تریکودرماریسی*، به طور گسترده برای تولید سلولاز تجاری استفاده می‌شود. سه نوع اصلی آنزیم سلولولیتیک تولید شده توسط قارچ *تریکودرماریسی* وجود دارد که عبارتند از (۱) بتا-گلوکوزیدازها (EC 3.2.1.21)، (۲) سلوبیوهیدرولازها (EC 3.2.1.91)، و (۳) اندوگلوکانازها (EC 3.2.1.4). از این آنزیم‌ها برای تبدیل سلولز به گلوکز استفاده می‌شود.

۱. کاهوی چینی گیاهی از تیره کلم‌سانان است.

۲. درخت پوپونا در مناطق گرمسیری و برخی مناطق استوایی واقع شده در آمریکای جنوبی رشد می‌کند.

فعالیت کمتر b-گلوکوزیداز نقص اصلی قارچ تریکودرماریسی است (Zhang et al. 2010). برخی از گونه‌های قارچی جدید برای تبدیل زیستی مقرون به صرفه پسماند لیگنوسلولزی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قارچ کریزوپورت کوپینسیس^۱ (عامل بیماری زا گیاهی)، به عنوان منبع دیگری از آنزیم سلولازها مورد بررسی قرار گرفته است (Falkoski et al. 2013). مطالعه دیگری نقش قارچ فوما/اگزیکو/ITCC 2049^۲ را نشان می‌دهد. این قارچ، معمولاً عامل بیماری زا در سیب زمینی است که می‌تواند برای تولید سلولاز استفاده شود (Tiwari et al. 2013). قارچ ترموفیلی مونیلیوفتورا سینامومیا^۳ و قارچ اسپرژیلوس استریکتوم^۴ به عنوان یک منبع زیستی احتمالی برای تولید سلولاز کشف شدند (Goldbeck et al. 2013; Mahajan et al. 2016). آنزیم بتا-گلوکوزیداز منحصر به فرد از قارچ فلینوس پیسیوس^۵ به دست آمد. این آنزیم حداکثر فعالیت ترانس گلیکوزیلاسیون را برای تولید القا کننده‌های سلولاز به دست می‌آورد (Gao et al. 2013). گلوکز زایلوز یکی دیگر از ساکاریدهای فراوان است. این ساکارید پس از هیدرولیز و ساکارزی کردن پسماند لیگنوسلولزی به دست می‌آید. استفاده از تبدیل زایلوز به ساکاریدهای قابل تخمیر برای بازده بالای بیواتانول اهمیت زیادی دارد. از طرف دیگر، سویه بومی مخمر ساکارومایسس سرویزیه قادر به تخمیر زایلوز به اتانول نیست. با استفاده از زیست شناسی مصنوعی، یک طراحی سویه جدید برای استفاده همزمان از اسید استیک، زایلوز و سلوبیوز ایجاد شد (Wei et al. 2015). در این طرح، برای امکان ایجاد استفاده از سلوبیوز، ژن gh1-1 برای آنزیم بتا-گلوکوزیداز داخل سلولی و ژن cdt-1 برای انتقال ترکیب سیکلودکستین کدگذاری می‌شود. در این طرح، از قارچ نوروسپورا کراسا استفاده شد. این قارچ در مخمر ساکارومایسس سرویزیه که به عنوان میزبان استفاده می‌شود، بیان و تکثیر شد (Wei et al. 2015). علاوه بر این، ژن‌های تجزیه کننده زایلوز XDH و XR از مخمر شفرسومایسس/استیپیت در سلول‌های ساکارومایسس سرویزیه بیان و تکثیر شدند. برای کمک به کاهش استات به اتانول، ژن adhE از باکتری اکالای در مخمر ساکارومایسس سرویزیه بیان شد. نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد که سویه نهایی، به طور قابل توجهی بازده اتانول را در مقایسه با سویه شاهد افزایش می‌دهد؛ زیرا سویه نهایی، در هر سه مسیر جذب اسید استیک، سلوبیوز و زایلوز و تبدیل آنها به بیواتانول عملکرد بهتری دارد (Wei et al. 2015).

1. Chrysosporthe cubensis

2. Phoma exigua ITCC 2049

3. M. cinnamomea

4. A. strictum

5. P. piceum

مخمر ساکارومایسس سرویزیه به دلیل تحمل pH گسترده و حساسیت کمتر به عامل عفونت قارچ و باکتری، به طور کلی برای تولید بیواتانول مورد توجه قرار می‌گیرد.

۸-۱-۳ آماده سازی و سم زدایی پسماند میوه و سبزیجات

پسماندهای خانگی و پسماندهای خمیر سبزیجات و میوه‌ها، طیف گسترده‌ای از مواد اولیه غنی از لیگنوسلولز است. آماده سازی شامل فرآیندهای مختلفی برای تبدیل مواد اولیه لیگنوسلولزی به اجزای ضروری آن مانند لیگنین، سلولز و همی سلولز است. روش‌های آماده سازی عمدتاً مربوط به حذف لیگنین، حفظ همی سلولز، کاهش سختی سلولز و افزایش تخلخل زیست توده است (Chiaramonti et al. 2012). یک روش اقتصادی آماده سازی باید به افزایش در دسترس بودن کربوهیدرات‌ها در مرحله هیدرولیز آنزیمی کمک کند؛ و در عین حال از دست دادن ساکاریدهای ساده برای هیدرولیز و تخمیر را کاهش دهد (Chiaramonti et al. 2012). شکل ۸-۲ روش‌های مختلف آماده سازی برای زیست توده پسماند میوه و سبزیجات را نشان می‌دهد. هدف اولیه یک فرآیند آماده سازی موثر عبارتند از: (Kumari and Singh 2018) (۱) به دست آوردن ساکاریدهای ساده با هیدرولیز، (۲) جلوگیری از از دست دادن ساکاریدهای ساده تشکیل شده، (۳) محدود کردن تولید بازدارنده‌ها، (۴) به حداقل رساندن نیازهای انرژی و (۵) کاهش هزینه تولید بیواتانول. روش‌های آماده سازی زیست توده به عنوان (Kumari and Singh 2018) (۱) آماده سازی فیزیکی/مکانیکی، (۲) پیش تصفیه شیمیایی، (۳) پیش تصفیه فیزیکوشیمیایی، و (۴) پیش تصفیه بیولوژیکی/آنزیمی طبقه بندی می‌شوند.

جدول ۸-۲ روش‌های مختلف آماده سازی مورد استفاده در پردازش زیست توده زباله را نشان می‌دهد. مرحله اولیه پیش تصفیه شامل کاهش اندازه مواد اولیه لیگنوسلولزی است؛ اما این کاهش اندازه نباید خیلی زیاد یا خیلی کم باشد. روش‌های آماده سازی بر اساس نوع و ترکیب مواد اولیه مورد استفاده برای تخمیر بیواتانول انتخاب می‌شوند (Kumari and Singh 2018). جدول ۸-۲ انواع فرآیندهای پیش تصفیه فیزیکی/مکانیکی را تعریف می‌کند. در این میان، فرآیند شکل دهی در ترکیب با مخلوط سازی، برش دهی و گرمایش، به عنوان یک روش مقرون به صرفه و آسان برای پردازش در نظر گرفته می‌شود. گرمایش امواج با طول موج کوتاه^۱ یک روش آماده سازی حرارتی است. این روش باید بر اساس ترکیب زیست توده در دماهای مناسب انجام شود (Li et al. 2012).

1. Microwave heating



شکل ۸-۲. روش‌های مختلف آماده سازی برای زیرست توده میوه و سبزیجات

آماده سازی با اسید، یک روش شیمیایی شناخته شده است. به طور کلی، این روش برای زیرست توده جوانه دار لیگنوسلولزی استفاده می شود و باعث تبدیل همی سلولز به مونومرهای آن می شود و در نهایت تولید بیواتانول را افزایش می دهد. اسیدهایی مانند اسید کلریدریک، اسید استیک، اسید فرمیک، اسید نیتروژن، اسید نیتریک، اسید مالیک، اسید فسفریک و اسید سولفوریک برای آماده سازی اسیدی مواد اولیه لیگنوسلولزی استفاده شده است (Bagudo et al. 2014; Ajayi and Adefila 2012; Bai et al. 2016; Sen et al. 2016; Ranjan et al. 2013; Han et al. 2013). پیش تصفیه با اسید به دو صورت استفاده می شود: (۱) غلظت اسید بالا در دماهای بسیار پایین تر و (۲) غلظت اسید پایین در دماهای بالا (Sen et al. 2016). نقطه ضعف رایج پیش تصفیه با اسید، تولید همزمان بازدارنده های مختلف مانند فورفورال، اسید استیک و ۵-هیدروکسی متیل فورفورال است. این بازدارنده ها، از رشد زیرست توده میکروبی جلوگیری می کند (Taherzadeh and Karimi 2008).

جدول ۸-۲. روش‌های آماده سازی

تصفیه فیزیکی		
Nakagawa et al. (2007)	برش دادن، خرد کردن، آسیاب چکشی، آسیاب گلوله ای، آسیاب دیسکی	کاهش اندازه مکانیکی
Gabhane et al. (2011)	تابش مایکروویو	فرآیند گرمایش ساده
Simona et al. (2013)	مخلوط کردن، گرم کردن و برش زدن زباله‌های زیست توده	فرآیند شکل دهی
پیش تصفیه شیمیایی		
Sen et al. (2016)	دمای بالا و غلظت اسید کمتر. دمای پایین و غلظت اسید بالاتر.	پیش تصفیه با اسید / تبدیل به قند
Gonçalves et al. (2014)	یا اسید پراستیک (H_2O_2) پراکسید هیدروژن	کاهش مقادیر لیگنین با استفاده از اکسیدان
Wan et al. (2011)	سدیم هیدروکسید، کلسیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید و آمونیاک بیشترین استفاده را از مواد قلیایی برای پیش تصفیه دارند.	پیش تصفیه با ماده قلیایی (پلی ساکاریدهای حل کننده)
Appels et al. (2012)	فرآیند ازن کافت زیست توده لیگنوسولزی برای افزایش تجزیه پذیری سلولز	پیش تصفیه با ازن
پیش تصفیه فیزیکوشیمیایی		
Bals et al. (2011)	آمونیاک مایع و فرآیند بخار تحت فشار	پیش تصفیه فیبر آمونیاک با استفاده از روش تقویت شده
Sen et al. (2016)	اولتراسونیک	اختلال در دیواره سلولی
Baêta et al. (2016)	بخار تحت فشار (۲۰ تا ۵۰ بار، در دمای ۱۶۰ تا ۲۷۰ درجه سانتیگراد) برای چند ثانیه	پیش تصفیه هیدرولیز خودتنظیمی ^۱ یا بخار تحت فشار
Rogalinski et al. (2008)	دما و فشار بالا (۱۶۰-۲۲۰ درجه سانتیگراد) برای حفظ حالت مایع آب و زیست توده در آب تا ۱۵ دقیقه استفاده می‌شود.	پیش تصفیه آب داغ مایع (حل شدن همی سلولز)
Zheng et al. (1995)	زیست توده با آب حاوی اکسیژن در دمای بیش از ۱۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۰.۵ تا ۲ مگاپاسکال برای کمتر از ۳۰ دقیقه تصفیه شده است.	پیش تصفیه اکسیداسیون مرطوب
پیش تصفیه بیولوژیکی		
Sindhu et al. (2016)	باکتری‌ها و قارچ‌های تولیدکننده سلولاز	هضم سلولز و لیگنین
Romano et al. (2009)	آنزیم‌های سلولاز و همی سلولاز	پیش تصفیه با آنزیم

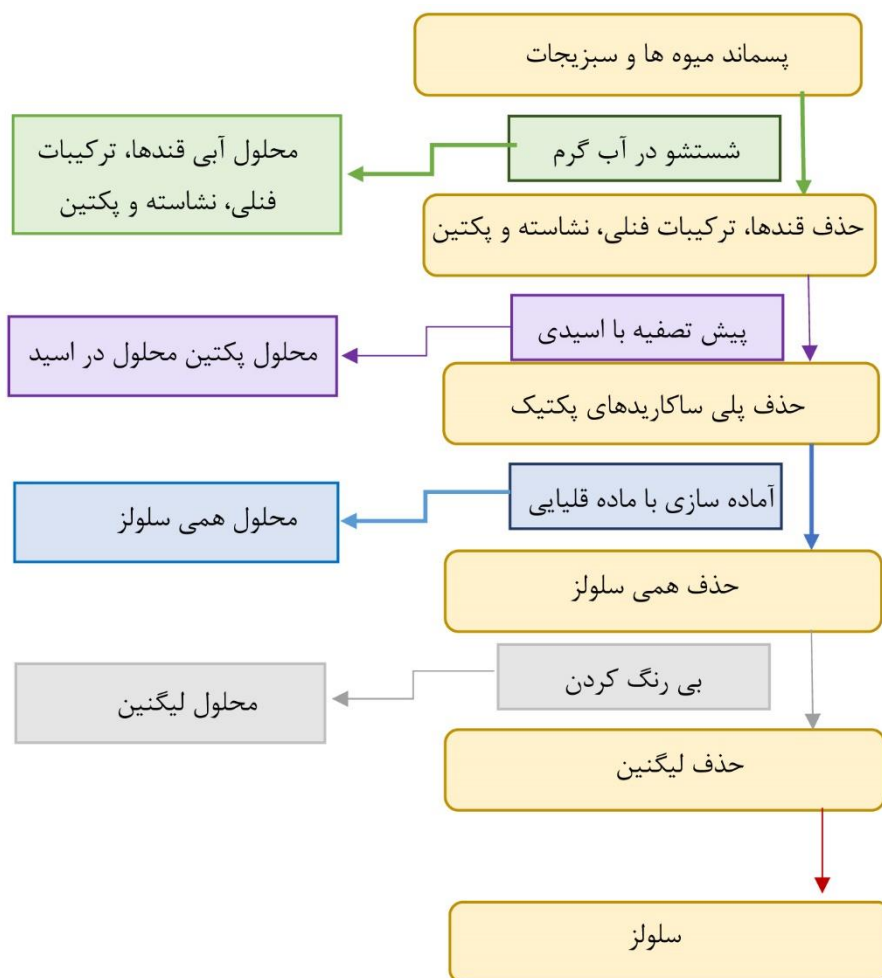
۱. غیرارادی، خود به خودی، به طرز خودکار

با این حال، پیش تصفیه با اسید غلیظ برای هیدرولیز سلولز بسیار موثر است؛ زیرا دارای حلالیت بیشتر سلولز و همی سلولز است؛ در حالی که به طور همزمان لیگنین را از مواد اولیه حذف می‌کند (Kumari and Singh 2018). پیش تصفیه با اسید و قلیا به طور گسترده برای مواد اولیه لیگنوسلولزی قابل استفاده می‌باشد. آمونیاک، کلسیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید عمدتاً از قلیاها برای آماده سازی استفاده می‌شوند (Wan et al. 2011).

امیدوارکننده‌ترین میکروب‌ها برای تصفیه زیستی، قارچ‌های پوسیده سفید مختلف مربوط به کلاس قارچ‌های چتری یا بازیدیومیست‌ها هستند. قارچ *فانوچایت کریسوسپوریوم*^۱ قادر به تجزیه بیولوژیکی لیگنین است. این قارچ نسبت به گونه‌های مختلف قارچ‌های پوسیده سفید به دلیل سرعت رشد بیش از حد آن، توانایی بسیار بالایی دارد (Sindhu et al. 2016). برای استفاده مفید از پسماند میوه و سبزیجات، استفاده از یک روش ترکیبی که شامل چندین روش آماده‌سازی است، بسیار موثر است. در این روش تفکیک، مواد اولیه پسماند میوه و سبزی با هزینه کم به اجزای سازنده آن تبدیل می‌شود. اجزای سازنده این پسماند، به طور همزمان قسمتی از چندین محصول جانبی مفید را ارائه می‌دهد. با این حال، سلولز محصول نهایی آماده سازی پسماند میوه و سبزیجات است. سلولز بیشتر برای تخمیر بیواتانول استفاده می‌شود. در این روش پسماند میوه و سبزی در آب داغ شسته و سپس در چندین محلول حاوی اسید، قلیا و عامل اکسیداتیو نگهداری می‌شوند. چنین روش‌های آماده سازی ترکیبی برای به دست آوردن بخش‌های مختلف قند، لیگنین، پکتین، سلولز، همی سلولز و سایر اجزای زیست فعال مفید هستند (Szymańska-Chargot et al. 2017). شکل ۸-۳ فرآیند تفکیک را برای آماده سازی پسماند میوه و سبزیجات نشان می‌دهد. در یک مطالعه، پیامدهای پارامترهای مختلف بر راندمان آماده سازی با استفاده از قارچ *سریوریوسیس سابورمیسپارا*^۲ برای تخمیر بیواتانول مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در نتیجه، تا ۹۴ درصد از تخریب سلولز با ۳۱/۵۹ درصد هضم لیگنین به دست آمد (Wanand Li 2010). آماده سازی بخش مهمی از تولید بیواتانول از مواد اولیه لیگنوسلولزی است. روش‌های آماده سازی به طور قابل توجهی بر کل فرآیند تولید تأثیر می‌گذارد؛ و تولید مشتقات لیگنوسلولز مانند اسید استیک، ۵-هیدروکسی متیل فورفورال، اسید فرمیک، فورفورال و اسید لوولینیک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر تجمع تغییرات شیمیایی در

1. *Phanerochaete chrysosporium*
2. *C. subvermisporea*

فرآیند آماده‌سازی به اندازه کافی زیاد باشد، این تغییرات می‌توانند به عنوان مهارکننده‌های آنزیمی در مراحل بعدی تخمیر میکروبی عمل کنند (Cavka and Jönsson 2013). وجود بازدارنده‌ها را می‌توان با استفاده از این موارد تایید کرد که شامل: (۱) افزودن مقداری عامل قلیاییت مانند آمونیوم هیدروکسید، کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید، (۲) استفاده از اثر آنزیمی پراکسیداز و لاکاز، (۳) عملیات حرارتی یا تبخیر، (۴) استخراج مایع-مایع یا استخراج با فشار بالا و (۵) تصفیه میکروبی با استفاده از قارچ تریکودرما (Zabed et al. 2016).



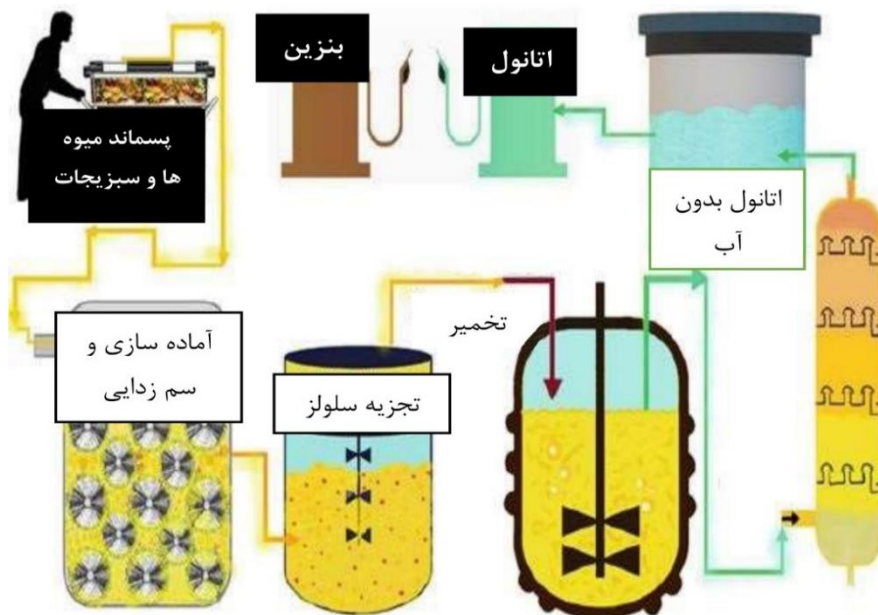
شکل ۸-۳. فرآیند تجزیه برای آماده سازی پسماند میوه و سبزیجات

۸-۱-۴ تولید بیواتانول

تولید بیواتانول از پسماند میوه و سبزیجات را می‌توان در سه مرحله به دست آورد: (۱) تبدیل به قند/هیدرولیز، (۲) تخمیر و (۳) جداسازی اتانول (تقطیر). به طور کلی، تخمیر بیواتانول با استفاده از برخی باکتری‌ها مانند *زیموموناس موبلیس* یا مخمر انجام می‌شود (Ma et al. 2008). مخمر مانند *ساکارومایسس سرویزیه* می‌تواند از کربوهیدرات‌ها استفاده کند؛ و برای تبدیل گلوکز به اتانول موثر است (Chen 2011). استفاده از کشت سلول مخمر برای هضم بی‌هوازی زیست توده باقی مانده می‌تواند ۳۰ تا ۵۰ درصد از اکسیژن مورد نیاز شیمیایی را کاهش دهد (Suwannarat and Ritchie 2015). سلول‌های مخمر طیف وسیعی از آنزیم‌های آمیلولیتیک مانند گلوکوامیلاز، α -آمیلاز و β -آمیلاز را در سلول‌های خود تولید نمی‌کنند. این آنزیم‌ها برای تجزیه کامل ساکاریدهای پیچیده به گلوکز ضروری است. YIR019C (STA4, MUC1, FLO11) و YIL099W (SGA1) دو ژن در سلول‌های مخمر هستند. این دو ژن فقط برای آلفا-گلوکوامیلازها کد گذاری می‌کنند. تولید اتانول را می‌توان به دو روش شامل؛ فرآیند ساکارزی کردن با تخمیر به طور همزمان یا فرآیند هیدرولیز جداگانه و به دنبال آن مرحله تخمیر انجام داد. در "ساکارزی کردن و تخمیر همزمان" و "ساکارزی کردن با تخمیر"، همراه با یک بیوراکتور تک محفظه ای انجام می‌شود. بنابراین فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان از نظر اقتصادی نسبت به هیدرولیز و تخمیر جداگانه قابلیت استفاده بهتری دارد. با این وجود، پارامترها و شرایط بهینه برای فرآیندهای ساکارزی کردن و تخمیر متنوع هستند (Vohra et al. 2014). به نظر می‌رسد فرآیند تولید یا تخمیر اتانول یک واکنش اکسایش و کاهش بیوشیمیایی در داخل سلول‌های مخمر است. فرایند تولید یا تخمیر اتانول به یک نسبت معین از فعالیت واکنش اکسایش و کاهش برای انجام بهینه واکنش نیاز دارد (Ma et al. 2016b). زایلوز یک ماده تشکیل دهنده مهم در زیست توده هیدرولیز شده است. مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* (که به طور گسترده برای تولید اتانول استفاده می‌شود) تخمیر گلوکز را انجام می‌دهد؛ اما نمی‌تواند زایلوز را تجزیه کند. یک مخمر *آسکومیسیتوز، پیچیا استیتی*^۱، یافت شد. این مخمر قادر به تخمیر زایلوز است؛ بنابراین کشت همزمان مخمرهای *پیچیا استیتی* و *ساکارومایسس سرویزیه* می‌تواند برای افزایش تخمیر مواد اولیه از قبل پردازش شده شامل گلوکز و زایلوز، موثر باشد (Kordowska-Wiater and Targonski 2001). مطالعات نشان داده است که روش کشت مشترک برای تخمیر بیواتانول اهمیت دارد. به طور کلی، کشت مشترک شامل مراحل زیر است: (۱) غیرفعال کردن باکتری

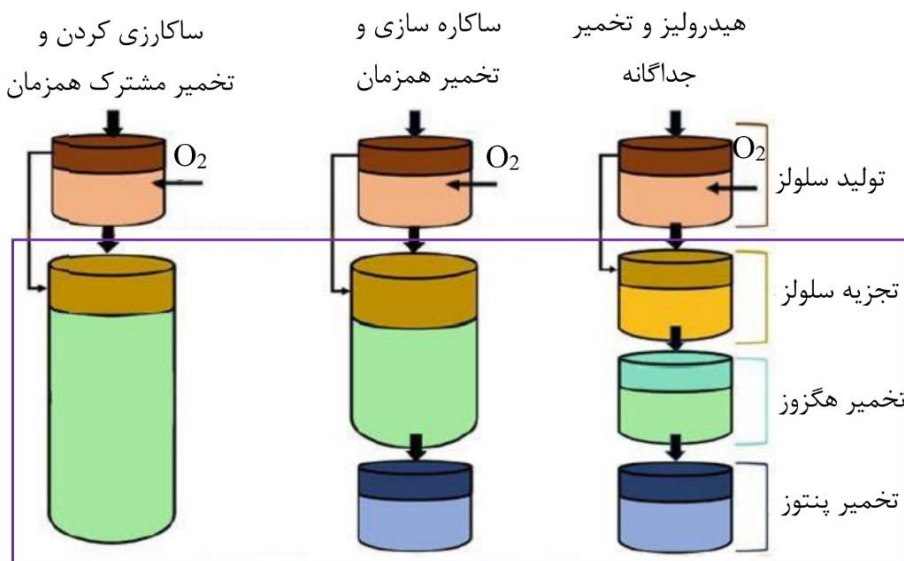
1. *P. stipitis*

زایموموناس موبیلیس و کشت همزمان گسسته مخمر پیچیا/استیپیت، (۲) باکتری زایموموناس موبیلیس با مخمر کاندیدا/تروپیکالیس، (۳) مخمر ساکارومایسس سرویزیه با باکتری پیچیا تانوفیلوس، و (۴) کشت همزمان مخمر ساکارومایسس سرویزیه با باکتری اکلاهی سویه KO11. با این حال، بهترین ترکیب برای تخمیر زایلوز و گلوکز، کشت همزمان مخمر پیچیا/استیپیت با باکتری غیرفعال زایموموناس موبیلیس است (Chen 2011). کارایی روش کشت همزمان بر اساس میزان رشد میکروارگانیسم‌ها بر روی مواد اولیه متنوع و شرایط تخمیر مانند pH و دما است (Cardona and Sánchez 2007). شکل ۸-۴ یک فرآیند کلی مرتبط با تخمیر اتانول از پسماند میوه و سبزیجات را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۴. فرآیند مرتبط با تخمیر بیواتانول از پسماند میوه و سبزیجات

تولید بیواتانول به طور اساسی در سه روش متفاوت انجام می‌شود. این روش‌ها شامل فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر مشترک همزمان، ساکاره سازی و تخمیر همزمان، و هیدرولیز و تخمیر جداگانه است. در روش هیدرولیز و تخمیر جداگانه، فرآیند تخمیر به طور کامل از فرآیند هیدرولیز لیگنوسلولز جدا شده است. پردازش جداگانه هیدرولیز آنزیمی و تخمیر، عملیات آنزیمی را در دمای بالا امکان‌پذیر می‌کند و عملکرد مناسب را نشان می‌دهد. کشت میکروبی برای مصرف قند و بهینه سازی در طی تخمیر به دمای کمتری نیاز دارد.



شکل ۸-۵. روش فرآوری در (هیدرولیز و تخمیر جداگانه)، (ساکاره سازی و تخمیر همزمان)، و (ساکارزی کردن و تخمیر مشترک همزمان)

شکل ۸-۵ تفاوت در پردازش این سه روش را نشان می‌دهد. در فرآیندهای "ساکارزی کردن و تخمیر مشترک همزمان" و "ساکارزی کردن و تخمیر همزمان"، هیدرولیز و تخمیر با هم اتفاق می‌افتند؛ تا غلظت گلوکز پایین‌تر فراهم شود. بنابراین کل فرآیند به سرعت انجام می‌شود. در فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان، گلوکز از پنتوز جدا می‌شود؛ اما در فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر مشترک همزمان، گلوکز و پنتوز را در همان بیوراکتور کنترل می‌کند (Canilha et al. 2012). فرایند "ساکارزی کردن و تخمیر همزمان" و فرآیند "ساکاره سازی و تخمیر مشترک همزمان" بسیار موثر هستند. این دو فرآیند برای تولید به یک بیوراکتور واحد نیاز دارند. در نتیجه، این دو فرآیند نسبت به هیدرولیز و تخمیر جداگانه بیشتر ترجیح داده می‌شود (Chandel et al. 2007). در تحقیقی که توسط اوگرن و همکاران (2007) انجام شد، تنظیمات فرآیند "ساکاره سازی و تخمیر همزمان" و "هیدرولیز و تخمیر جداگانه" برای تولید بیواتانول با استفاده از ذرت پیش‌پردازش شده با ۸ درصد مواد جامد نامحلول در آب انجام دادند و با یکدیگر مقایسه کردند. در طول هیدرولیز و تخمیر جداگانه، ماده آبیکی ذرت پیش‌پردازش شده دارای غلظت قابل توجهی از بازدارنده‌ها است. این بازدارنده‌ها بر هیدرولیز آنزیم تأثیر منفی می‌گذارد؛ اما فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان تأثیر منفی مهارکننده‌ها را به حداقل می‌رساند. فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان، مهار گلوکز (در طول هیدرولیز) را به

حداقل می‌رساند. بنابراین فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان به عنوان یک ترکیب بهبود یافته نسبت به فرآیند هیدرولیز و تخمیر جداگانه تعیین شد (Ohgren et al. 2007). حالت پیوسته یا متوالی، متوالی تکرارشونده و حالت نیمه پیوسته روش‌های استاندارد هستند؛ که برای تولید بیواتانول استفاده می‌شوند. در حالت تولید متوالی، ماده غذایی در مرحله اولیه تخمیر بدون افزودن یا حذف پیش نیاز بیشتر به محیط تامین می‌شود (Hadiyanto et al. 2013). حالت متوالی به عنوان یک روش کمترین نیاز به منابع، آسان و انعطاف‌پذیر برای اجرا در سیستم‌های کنترلی در تخمیر شناخته شده است. زمانی که فرآیند با غلظت بالای محصول مواجه می‌شود، یک سیستم حلقه بسته در مراحل ابتدایی و پایانی تخمیر، غلظت قند و مواد مهارکننده را در سطح بالا فراهم می‌کند (Thatoi et al. 2016). حالت دسته ای تخمیر شامل چندین مزیت پردازشی مانند گندزدایی کلی، عدم نیاز به مهارت‌های کاری پیشرفته، کنترل آسان، حمل آسان مواد اولیه و انعطاف پذیری برای چندین مشخصات محصول است (Jain and Chaurasia 2014)؛ اما بازده به طور قابل توجهی کمتر است؛ و نیاز به هزینه نیروی کار بالایی دارد. وجود غلظت قابل توجهی از ساکاریدها در داخل بیوراکتور ممکن است، باعث مهار رشد زیست توده میکروبی و تولید اتانول شود (Cheng et al. 2009). برای غلبه بر این مهار برای افزایش تولید اتانول، روش تخمیر نیمه پیوسته ترجیح داده می‌شود. تخمیر نیمه پیوسته شامل تغذیه بستر به راکتور و اجتناب از حذف پساب است. بنابراین به عنوان ترکیبی از حالت دسته ای و پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در روش نیمه پیوسته، پیش نیاز باید با سرعت خاصی تغذیه شود، در حالی که حجم کشت متفاوت است. برای بازده بالاتر اتانول در حالت نیمه پیوسته، حفظ غلظت کمتر پیش نیاز ضروری است؛ زیرا غلظت کمتر پیش نیاز برای تبدیل قند قابل تخمیر به اتانول مناسب است (Jain and Chaurasia 2014). حالت نیمه پیوسته دارای چندین مزیت شامل، دسترسی بهتر به اکسیژن محلول، سمیت کمتر، تخمیر سریع و بازده اتانول بالا می‌باشد (Cheng et al. 2009). حالت نیمه پیوسته به طور موثر در سیستم ساکارزی کردن و تخمیر همزمان با تغذیه پیوسته مواد اولیه پیش پردازش شده برای دستیابی به تخمیر بالا و بازده اتانول اجرا شده است (Azhar et al. 2017). بیوراکتور به طور مداوم با پیش نیاز، محیط کشت، و مواد مغذی بارگذاری می‌شود، در حالی که مقدار محیط کشت ثابت می‌ماند؛ و محصولات نهایی به طور مداوم از راکتور خارج می‌شوند. برخی از محصولات خاص مورد نظر مانند زیست توده میکروبی، قند باقی مانده و اتانول را می‌توان از بیوراکتور استخراج کرد (Azhar et al. 2017). استفاده از حالت پیوسته نسبت به حالت دسته‌ای و نیمه پیوسته، به دلیل مزایایی مانند استفاده از بیوراکتورهای کوچکتر، بازده بالا در تولید

اتانول و کارایی اقتصادی بیشتر انتخاب می‌شود. توانایی مخمر ساکارومایسس سرویزیه در تخمیر و تولید اتانول با گذشت زمان کشت، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. میزان خطر آلوده شدن در محیط کشت تخمیر در حالت پیوسته بیشتر از هر حالت دیگر تخمیری است (Chandel et al. 2007).

۸-۱-۵ استخراج اتانول با تقطیر

بعد از تمام شدن فرایند تخمیر، مراحل دیگری آغاز می‌شود. در این مراحل، با انجام چندین عملیات واحد، بیواتانول از محلول تخمیری استخراج می‌شود. در ابتدا، جداسازی مایع-جامد انجام می‌شود؛ تا اجزای جامد (شامل قندهای باقیمانده) و بیواتانول از محلول تخمیری جدا شوند. بدون شک، فیلتراسیون و سانتریفیوژ بهترین انتخاب برای جداسازی مایع از جامد است. برای کاهش مقادیر آب در هیدرولیز، مایع شناور سطحی به دستگاه تبخیرکننده دوار منتقل می‌شود. استفاده از تبخیر چند مرحله‌ای به دستیابی به میعان خالص با عصاره غلیظ کمک می‌کند. تقطیر پس از تبخیر انجام می‌شود. میعان حاوی بیواتانول به واحد تقطیر منتقل می‌شود. جداسازی اتانول از فرایند میعان بر اساس تفاوت در نقاط جوش مخلوط آب (۱۰۰ درجه سانتیگراد) و بیواتانول (تقریباً ۷۸ درجه سانتیگراد) است. اگر محلول آب و اتانول بسیار رقیق باشد، تقطیر تکرارشونده برای رسیدن به غلظت اتانول بیش از ۹۵ درصد ترجیح داده می‌شود. تولید اتانول زیستی با استفاده از تقطیر به راندمان ۹۹/۶ درصد می‌رسد؛ تا پسماند تبخیری بیواتانول را به حداقل برساند (Avilés Martínez et al. 2012; Balat 2011).

۸-۲ عوامل موثر بر تخمیر

پسماند میوه و سبزیجات دارای مواد مغذی شیمیایی کافی برای رشد و تخمیر میکروبی است. مطالعات هیچ تاثیر قابل توجهی بر تولید اتانول پس از اضافه کردن افزودنی‌های معدنی خارجی مانند KH_2PO_4 و $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ به محیط تولید نشان نمی‌دهد (Thongdumyu et al. 2014; Tang et al. 2008; Ma et al. 2008). اضافه کردن یون کلسیم به تخمیر اتانول توسط ساکارومایسس سرویزیه KRM-1 با استفاده از پسماند آشپزخانه، انجام شده است. این عملیات موجب می‌شود که یون کلسیم می‌تواند میزان انعقاد سلول‌های مخمر را به طرز قابل توجهی افزایش دهد. (Ma et al. 2009). علاوه بر مواد مغذی، تخمیر اتانول زیستی به چندین شرایط تخمیر مانند حجم سلول‌های میکروبی افزوده شده به محیط، دما برای فرآیند ساکارزی کردن / تخمیر، pH، میزان رطوبت و زمان تخمیر

بستگی دارد. جدول ۸-۳ عوامل موثر بر تولید بیواتانول و شرایط بهینه برای تخمیر را نشان می‌دهد.

جدول ۸-۳. عوامل موثر بر تخمیر بیواتانول

پارامتر	تأثیر	شرایط بهینه	منابع
pH	PH بالا باعث غیر فعال شدن آنزیم می‌شود	۴-۵	Ma et al. (2008, 2016b) and Tang et al. (2008)
دمای فرآیند ساکارزی کردن	PH بالا باعث تخریب آنزیم می‌شود	۵۰-۶۰ درجه سانتی گراد	Hong and Yoon (2011) and Tang et al. (2008)
دمای تخمیر	تأثیر فعالیت میکروبی	۳۰-۳۸ درجه سانتی گراد	Ma et al. (2008, 2016b), Le Man et al. (2010) and Tang et al. (2008)
اندازه سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط	مقدار کمی از افزودن سلول‌های میکروبی به محیط، تأثیری بر رشد آهسته سلولی دارد	۱۰ درصد (حجمی به حجمی)	Ma et al. (2008, 2016b)
مقادیر رطوبت / نسبت جامد به مایع	رشد و فعالیت میکروبی	۰:۱/۵	Ma et al. (2008) and Uncu and Cekmecelioglu (2011)
زمان تخمیر	بازده اتانول	۴۰-۴۸ ساعت	Ma et al. (2008, 2016a) and Tang et al. (2008)

pH می‌تواند ماهیت پروتئین‌ها را تغییر دهد. آنزیم‌های متعددی در فرآیندهای متابولیسم که در طی تخمیر اتفاق می‌افتد، مشارکت دارند. pH بسیار پایین ممکن است ماهیت و ساختار آنزیم‌ها را با ایجاد تغییر مکان پیوند شیمیایی تغییر دهد. مشاهده شده است که در pH بالاتر، مخمر به جای تولید بیواتانول، اسید تولید می‌کند (Tahiret al. 2010). فعالیت‌های متابولیسم میکروبی در اصل واکنش‌هایی هستند که توسط آنزیم‌ها فعال شده‌اند. این واکنش‌ها به عوامل خارجی متعددی مانند دما و pH وابسته هستند. تغییر دما با تغییر ساختار آنزیم به شدت بر مسیرهای متابولیسم تأثیر می‌گذارد.

به طور معمول، فرآیند ساکارزی کردن با استفاده از آلفا-آمیلاز در شرایط گرمای بالا در دمای ۹۵-۱۰۵ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود، در حالی که دمای تخمیر بر اساس ترکیب ماده اولیه است (Xu et al. 2016)؛ و به طور کلی دمای تخمیر در محدوده ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد

متغیر است (Vohra et al. 2014). اندازه سلول‌های اولیه میکروبی اضافه شده به محیط به طور قابل توجهی بر تراکم سلول‌های میکروبی در طول تخمیر تأثیر می‌گذارد. اندازه کوچک سلول‌های میکروبی اضافه شده به محیط با آهسته کردن رشد سلولی و کاهش تولید اتانول منجر به یک فاز تاخیری طولانی‌تر می‌شود؛ اما اندازه بزرگ سلول‌های میکروبی اضافه شده باعث رشد بیش از حد سلول‌ها می‌شود. اندازه بزرگ سلول‌های میکروبی باعث رقابت پیش نیاز برای جمعیت میکروبی می‌شود (Ma et al. 2008, 2016b). پسماند میوه و سبزیجات دارای مقادیر آب بالایی هستند. این مقادیر آب بالا، به طور قابل توجهی بر رشد و فعالیت میکروبی تأثیر می‌گذارد. نسبت جامد به مایع بالا منجر به غلظت اتانول بیشتر می‌شود. نسبت جامد به مایع بالا، بر فعالیت میکروبی تأثیر منفی می‌گذارد (Ma et al. 2008). نسبت جامد به مایع کم بر فعالیت میکروبی تأثیر نمی‌گذارد؛ اما در طول فرآیند تقطیر، رطوبت بالا در زیست توده پسماند انرژی بسیار زیادی را می‌طلبد؛ و در نهایت هزینه تولید اتانول را افزایش می‌دهد. راندمان تخمیر به شدت تحت تأثیر زمان افزودن سلول‌های میکروبی به محیط قرار می‌گیرد. طولانی شدن زمان تخمیر نیاز به مصرف انرژی اضافی دارد. همچنین، طولانی شدن زمان تخمیر، هزینه تولید اتانول را افزایش می‌دهد. زمان تخمیر کافی از تجمع محصولات جانبی (گلیسرول، اسیدهای آلی) جلوگیری می‌کند. محصولات جانبی مسئول مهار فعالیت مخمر هستند (Ma et al. 2016a).

۸-۳ اتانول به عنوان سوخت زیستی

بیواتانول دارای عدد اکتان بالا است. عدد اکتان بالا، عملکرد سوخت را تعیین می‌کند. عدد اکتان بالا به معنای تراکم بیشتری است؛ که سوخت قبل از اشتعال می‌تواند تحمل کند. اعداد اکتان کم باعث احتراق زودرس و ضربه به موتور/سیلندر می‌شود؛ بنابراین موتورهای بنزینی به نسبت تراکم بالایی نیاز دارند. این نسبت تراکم بالا، می‌تواند با سوختی با عدد اکتان بالا به دست آید. بیواتانول به دلیل داشتن عدد اکتان بالا به عنوان سوختی انتخاب می‌شود؛ که می‌تواند در موتورهای با کارایی بالا استفاده شود (Dabelstein et al. 2000).

مقادیر بالای اکسیژن باعث افزایش راندمان احتراق و کاهش انتشار هیدروکربن می‌شود. جدول ۸-۴ اثر اختلاط اتانول را بر پارامترهای مختلف اندازه گیری عملکرد موتور با احتراق جرقه ای نشان می‌دهد (Thangavelu et al. 2016). در حین اندازه گیری گازهای گلخانه‌ای، کاهش قابل توجهی در انتشار هیدروکربن‌های نسوخته و دی‌اکسید کربن مشاهده شد

(Karavalakis et al. 2014). با این حال، کاهش قابل توجهی در انتشار اکسیدهای نیتروژن، دی اکسید کربن و سایر انتشارات غیرقابل کنترل مانند کربونیل ها، آروماتیک ها، ذرات معلق و ... وجود ندارد (Thangavelu et al. 2016). استفاده از بیواتانول نیازی به تغییر در تنظیم خودرو ندارد و گازهای گلخانه ای را منتشر نمی کند. همچنین، تولید بیواتانول با هزینه مقرون به صرفه انجام می شود و به محیط زیست آسیب نمی رساند (Ritslaid et al. 2010; Sutjahjo 2018).

جدول ۸-۴. تاثیر ترکیب اتانول بر پارامترهای مختلف ارزیابی عملکرد موتورها

پارامترهای عملکرد سوخت	تأثیر بر روی موتور	منابع
کارایی احتراق	افزایش	Bayraktar (2005, 2007)
دمای سیلندر	افزایش	Thangavelu et al. (2016)
فشار سیلندر	افزایش	Thangavelu et al. (2016)
سرعت شعله	افزایش	Thangavelu et al. (2016)
مدت زمان احتراق	کاهش	Bayraktar (2005, 2007)
سرعت احتراق	کاهش	Bayraktar (2005, 2007)
دمای احتراق	کاهش	Bayraktar (2005, 2007)
حداکثر میزان آزادسازی حرارت	کاهش	Thangavelu et al. (2016)
گشتاور موتور	بهبود قابل توجه	Balki et al. (2014) and Topgül et al. (2006)
مشکل ضربه به موتور	مشکل قابل برطرف شدن	Thangavelu et al. (2016)
مشکل راه اندازی سرما	مشکل قابل برطرف شدن	Thangavelu et al. (2016)
قدرت ترمز	بهبود قابل توجه	Yücesu et al. (2006)
کارایی حرارتی ترمز	بهبود قابل توجه	Munsin et al. (2013) and Balki et al. (2014)
کارایی حجمی	بهبود شدن	Kiani et al. (2010) and Balki et al. (2014)
فشار میانگین مؤثر ترمز	بهبود شدن	Zhuang and Hong (2013)
مصرف سوخت خاص ترمز	کاهش یافته در مخلوط های کمتر (E5-E20) و افزایش یافته در مخلوط های بیشتر (E60-E80)	Türköz et al. (2014)
انتشار گازهای گلخانه ای	کاهش یافته	Karavalakis et al. (2014)

۸-۴ آینده بیواتانول در کشور هند

در حال حاضر، جمعیت کشور هند به شدت به منابع سوخت متداول (فسیلی) وابسته است. نیاز انرژی کشور هند در درجه اول متکی به نفت خام وارداتی است؛ تا نیازهای مصرف داخلی خود را تامین کند. با این حال، طبق «سیاست ملی سوخت‌های زیستی ۲۰۱۸»، اتانول زیستی تولید شده از نیشکر، ذرت خوشه ای شیرین، چغندر قند، ذرت، باقی مانده‌های زباله‌های جنگلی/کشاورزی، سیب‌زمینی فاسد، گیاه ریشه نشاسته‌ای، تفاله و ... برای حمل‌ونقل یا سوخت ثابت استفاده می‌شود. طبق این سیاست، دولت نیز اقدامات مهمی را برای پذیرش سوخت‌های زیستی انجام می‌دهد. دولت هند یک برنامه بنزین ترکیبی ۵ تا ۱۸ درصدی اتانول را آغاز می‌کند. در این برنامه، اتانول تولید شده از مواد اولیه زیست توده مختلف با بنزین ترکیب می‌شود. به طور مشابه، تجاری‌سازی و توسعه فناوری‌های بیواتانول نسل دوم ترویج یافته است (Das 2020). بازار اتانول هند بر اساس کاربرد آن به عنوان حلال، نوشیدنی، سوخت و افزودنی سوخت، ضد عفونی کننده، طعم دهنده و عطر طبقه بندی می‌شود. دولت بر روش‌های تولید سوخت زیستی با استفاده از زیست توده زباله برای تولید اتانول در آینده تاکید دارد. برای کاهش وابستگی به واردات نفت خام، دولت هند تولیدکنندگان قند را تشویق می‌کند؛ تا بیواتانول را برای شرکت‌های بازاریابی نفت تولید کنند. به طور قابل پیش‌بینی، تولید اتانول تا سال ۲۰۳۰ سه تا پنج برابر افزایش می‌یابد؛ تا نیاز به برنامه ۲۰ درصد مخلوط اتانول با بنزین را برآورده کند. Bajaj Hindustan Sugar، Triveni Engineering & Industries، Balrampur Chini Mills Ltd، India Glycols، HPCL Biofuels Limited، Ltd. Mawana Sugars، Jeypore Sugar Company Ltd، Shree Renuka Sugars Ltd، Ltd. Simbhaoli Sugars. و E.I.D Parry India Ltd، Ltd. برخی از تولیدکنندگان اصلی در بازار اتانول هند هستند. طرح TATA (یک شرکت با امکانات مناسب) پروژه‌ای از BPCL (شرکت نفتی منحصربه فرد در هند) برای احداث یک کارخانه تولید بیواتانول با ظرفیت ۱۰۰،۰۰۰ لیتر در روز در استان اوریسا واقع در شهر بارگاه در کشور هند دریافت کرد (Web Resource 1 2020). با ترویج استفاده از مواد اولیه سلولزی/کشاورزی برای تولید بیواتانول، دولت هند به کشاورزان فرصتی می‌دهد؛ تا از طریق پسماند کشاورزی خود، درآمد اضافی کسب کنند. سوزاندن زیست توده زباله‌های کشاورزی باعث آلودگی هوا می‌شود. بنابراین استفاده از مواد اولیه لیگنوسلولزی، تولید بنزین مخلوط با اتانول را فراهم می‌کند. همچنین، استفاده از این مخلوط سوختی، آلودگی زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد.

۸-۵ نتیجه گیری

آینده اتانول زیستی با میزان بیشتری بر مهندسی متابولیسم، ژنتیک میکروارگانیسم‌ها و محصولات غیرغذایی مورد استفاده در طی تخمیر مرتبط است. هدف اصلی این روش‌های مهندسی زیستی، تکامل میکروب‌هایی است؛ که قادر به تبدیل موثر زیست توده پسماند لیگنوسلولزی یا محصولات غیرغذایی به قند می‌باشند. باقی مانده میوه‌ها و سبزیجات حاوی مقادیر زیادی کربوهیدرات‌های ساده و پیچیده هستند؛ و از این قندها می‌توان به عنوان ماده خام و تازه برای تولید بیواتانول با استفاده از کشت میکروبی استفاده کرد. در حال حاضر ۸۰ درصد بیواتانول از غلات خوراکی مانند شکر و نشاسته تولید می‌شود. اخیراً، زیست توده لیگنوسلولزی برای تولید بیواتانول در نظر گرفته شده است. نیاز به توجه بیشتر به تولید آنزیم‌های سلولولیتیک وجود دارد؛ زیرا هزینه تولید آنزیم بیش از ۵۰ درصد از هزینه فرآیند شیرین‌سازی زیست توده را تشکیل می‌دهد. آنزیم مورد استفاده برای هیدرولیز سلولز، با استفاده از مهندسی مولکولی خود آنزیم‌ها یا مهندسی ژنتیکی میکروارگانیسم‌های تولیدکننده آنزیم، قابل بهبود است؛ بنابراین هزینه تولید می‌تواند کاهش یابد. در تولید بیواتانول نسل دوم، دو مرحله جداگانه برای فرآیند شیرین‌سازی و تخمیر استفاده می‌شود. ساکارزی کردن و تخمیر به صورت جداگانه، باعث انجام این دو مرحله در شرایط بهینه می‌شود. به منظور ساکارزی کردن و تخمیر همزمان، لازم است یک میکروب مهندسی شده یا جداسازی (جدا شدن از محیط طبیعی یا جمعیت میکروبی) شود؛ تا بتواند هیدرولیز سلولز و تخمیر اتانول را به صورت همزمان انجام دهد. در غیر این صورت، می‌توان از کشت مشترک دو یا چند میکروب برای فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر ترکیبی استفاده کرد. بیواتانول تولید شده از پسماند کشاورزی و زیست توده پسماند میوه و سبزیجات، یک سوخت سازگار با محیط زیست است. این سوخت موتور را مجبور به تولید گازهای گلخانه‌ای کمتر می‌کند. پسماند میوه و سبزیجات با هزینه کمتر و دسترسی گسترده، انتخاب اقتصادی بسیار مناسبی برای تولید بیواتانول هستند.

منابع

- Ajayi OA, Adefila SS (2012) Methanol production from cow dung. J Environ Earth Sci 2(7): 2225–0948
- Alarcón García MÁ, López Vargas JH, Restrepo Molina DA (2015) Agro-industrial fruit co-products in Colombia, their sources and potential uses in processed food industries: a review. Rev Facul Nacl Agron Medellín 68(2):7729–7742
- Allen M (2017) Fossil fuel demand scenarios. Energy News 35(1):6–7
- Appels L, Impe JV, Dewil R (2012) Oxidizing agents and organic solvents as pretreatment for

- anaerobic digestion. In: Mudhoo A (ed) Biogas production. <https://doi.org/10.1002/9781118404089.ch7>
- Arto I, Capellán-Pérez I, Lago R, Bueno G, Bermejo R (2016) The energy requirements of a developed world. *Energy Sustain Dev* 33:1–13
- Aung AA, Than SS, Hla PK (2017) Evaluation of the yield of bioethanol from sterilized and unsterilized fruit pulp of waste pineapple. *Univ Res J* 10:298
- Avilés Martínez A, Saucedo-Luna J, Segovia-Hernandez JG, Hernandez S, Gomez-Castro FI, Castro-Montoya AJ (2012) Dehydration of bioethanol by hybrid process liquid–liquid extraction/ extractive distillation. *Ind Eng Chem Res* 51(17):5847–5855
- Azhar SHM, Abdulla R, Jambo SA, Marbawi H, Gansau JA, Faik AAM, Rodrigues KF (2017) Yeasts in sustainable bioethanol production: a review. *Biochem Biophys Rep* 10:52–61
- Baêta BEL, Lima DRS, Adarme OFH, Gurgel LVA, de Aquino SF (2016) Optimization of sugarcane bagasse autohydrolysis for methane production from hemicellulose hydrolyzates in a biorefinery concept. *Bioresour Technol* 200:137–146
- Bagudo BU, Dangoggo SM, Usman J (2014) Bioethanol production potential of *Andropogon gayanus*. *Ann Biol Res* 5(1):106–111
- Bai X, Lant PA, Jensen PD, Astals S, Pratt S (2016) Enhanced methane production from algal digestion using free nitrous acid pretreatment. *Renew Energy* 88:383–390
- Balat M (2011) Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review. *Energ Conver Manage* 52(2):858–875
- Balki MK, Sayin C, Canakci M (2014) The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine. *Fuel* 115:901–906
- Bals B, Wedding C, Balan V, Sendich E, Dale B (2011) Evaluating the impact of ammonia fiber expansion (AFEX) pretreatment conditions on the cost of ethanol production. *Bioresour Technol* 102(2):1277–1283
- Bayraktar H (2005) Experimental and theoretical investigation of using gasoline–ethanol blends in spark-ignition engines. *Renew Energy* 30(11):1733–1747
- Bayraktar H (2007) Theoretical investigation of flame propagation process in an SI engine running on gasoline–ethanol blends. *Renew Energy* 32(5):758–771
- Bhuvaneshwari M, Sivakumar N (2019) Bioethanol production from fruit and vegetable wastes. In: *Bioprocessing for biomolecules production*, pp 417–427
- Canilha L, Chandel AK, Suzane dos Santos Milessi T, Antunes FAF, Luiz da Costa Freitas W, das Graças Almeida Felipe M, da Silva SS (2012) Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation. *J Biomed Biotechnol* 2012
- Cardona CA, Sánchez ÓJ (2007) Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresour Technol* 98(12):2415–2457
- Casabar JT, Unpaprom Y, Ramaraj R (2019) Fermentation of pineapple fruit peel wastes for bioethanol production. *Biomass Convers Bioref* 9(4):761–765
- Cavka A, Jönsson LJ (2013) Detoxification of lignocellulosic hydrolysates using sodium borohydride. *Bioresour Technol* 136:368–376

- Chandel AK, Chan ES, Rudravaram R, Narasu ML, Rao LV, Ravindra P (2007) Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnol Mol Biol Rev* 2(1):14–32
- Chen Y (2011) Development and application of co-culture for ethanol production by co-fermentation of glucose and xylose: a systematic review. *J Ind Microbiol Biotechnol* 38(5):581–597
- Cheng NG, Hasan M, Kumoro AC, Ling CF, Tham M (2009) Production of ethanol by fed-batch fermentation. *Pertanika J Sci Technol* 17(2):399–408
- Chiaromonti D, Prussi M, Ferrero S, Oriani L, Ottonello P, Torre P, Cherchi F (2012) Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method. *Biomass Bioenergy* 46:25–35
- Chniti S, Djelal H, Hassouna M, Amrane A (2014) Residue of dates from the food industry as a new cheap feedstock for ethanol production. *Biomass Bioenergy* 69:66–70
- Dabelstein W, Reglitzky A, Schütze A, Reders K, Brunner A (2000) Automotive fuels. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, pp 1–41
- Das S (2020) The National Policy of biofuels of India—a perspective. *Energy Policy* 143:111595
- de Oliveira JAR, da Conceição AC, da Silva Martins LH, Moreira DKT, Passos MF, Komesu A (2021) Evaluation of the technological potential of four wastes from Amazon fruit industry in glucose and ethanol production. *J Food Process Eng* 44(2):e13610
- Demirbas A (2007) Producing and using bioethanol as an automotive fuel. *Energy Sources Pt B* 2(4):391–401
- Esparza I, Jiménez-Moreno N, Bimbela F, Ancín-Azpilicueta C, Gandía LM (2020) Fruit and vegetable waste management: conventional and emerging approaches. *J Environ Manage* 265: 110510
- Falkoski DL, Guimarães VM, de Almeida MN, Alfenas AC, Colodette JL, de Rezende ST (2013) *Chrysosporthe cubensis*: a new source of cellulases and hemicellulases to application in biomass saccharification processes. *Bioresour Technol* 130:296–305
- Gabhane J, William SP, Vaidya AN, Mahapatra K, Chakrabarti T (2011) Influence of heating source on the efficacy of lignocellulosic pretreatment—a cellulosic ethanol perspective. *Biomass Bioenergy* 35(1):96–102
- Gao L, Gao F, Zhang D, Zhang C, Wu G, Chen S (2013) Purification and characterization of a new β -glucosidase from *Penicillium piceum* and its application in enzymatic degradation of delignified corn stover. *Bioresour Technol* 147:658–661
- Gnansounou E, Pandey A (eds) (2016) *Life-cycle assessment of biorefineries*. Elsevier, Amsterdam
- Goldbeck R, Ramos MM, Pereira GA, Maugeri-Filho F (2013) Cellulase production from a new strain *Acremonium strictum* isolated from the Brazilian biome using different substrates. *Bioresour Technol* 128:797–803
- Gonçalves FA, Ruiz HA, da Costa Nogueira C, dos Santos ES, Teixeira JA, de Macedo GR (2014) Comparison of delignified coconuts waste and cactus for fuel-ethanol production by the simultaneous and semi-simultaneous saccharification and fermentation strategies. *Fuel* 131: 66–76
- Hadiyanto H, Ariyanti D, Aini AP, Pinundi DS (2013) Batch and fed-batch fermentation system on ethanol production from whey using *Kluyveromyces marxianus*. *Int J Renew Energy Dev* 2(3): 127

- Hafid HS, Shah UKM, Baharuddin AS, Ariff AB (2017) Feasibility of using kitchen waste as future substrate for bioethanol production: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 74:671–686
- Han SH, Cho DH, Kim YH, Shin SJ (2013) Biobutanol production from 2-year-old willow biomass by acid hydrolysis and acetone–butanol–ethanol fermentation. *Energy* 61:13–17
- Hong YS, Yoon HH (2011) Ethanol production from food residues. *Biomass Bioenergy* 35 (7):3271–3275
- Itelima J, Onwuliri F, Onwuliri E, Onyimba I, Oforji S (2013) Bio-ethanol production from banana, plantain and pineapple peels by simultaneous saccharification and fermentation process. *Int J Environ Sci Dev* 4:213–216
- Jain A, Chaurasia SP (2014) Bioethanol production in membrane bioreactor (MBR) system: a review. *Int J Environ Res Dev* 4(4):387–394
- Joglekar SN, Pathak PD, Mandavgane SA, Kulkarni BD (2019) Process of fruit peel waste biorefinery: a case study of citrus waste biorefinery, its environmental impacts and recommendations. *Environ Sci Pollut Res* 26(34):34713–34722
- Karavalakis G, Short D, Vu D, Villela M, Asa-Awuku A, Durbin TD (2014) Evaluating the regulated emissions, air toxics, ultrafine particles, and black carbon from SI-PFI and SI-DI vehicles operating on different ethanol and iso-butanol blends. *Fuel* 128:410–421
- Karimi S, Karimi K (2018) Efficient ethanol production from kitchen and garden wastes and biogas from the residues. *J Clean Prod* 187:37–45
- Kiani MKD, Ghobadian B, Tavakoli T, Nikbakht AM, Najafi G (2010) Application of artificial neural networks for the prediction of performance and exhaust emissions in SI engine using ethanol-gasoline blends. *Energy* 35(1):65–69
- Kordowska-Wiater M, Targonski Z (2001) Ethanol production on the media containing glucose and xylose by co-culture of *Pichia stipitis* CCY39501 and respiratory deficient mutant of *Saccharomyces cerevisiae* V30. *Electron J Pol Agric Univ* 4(2):15–28
- Kumari D, Singh R (2018) Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: a critical review. *Renew Sustain Energy Rev* 90:877–891
- Le Man H, Behera SK, Park HS (2010) Optimization of operational parameters for ethanol production from Korean food waste leachate. *Int J Environ Sci Technol* 7(1):157–164
- Li L, Kong X, Yang F, Li D, Yuan Z, Sun Y (2012) Biogas production potential and kinetics of microwave and conventional thermal pretreatment of grass. *Appl Biochem Biotechnol* 166(5): 1183–1191
- Ma H, Wang Q, Zhang W, Xu W, Zou D (2008) Optimization of the medium and process parameters for ethanol production from kitchen garbage by *Zymomonas mobilis*. *Int J Green Energy* 5(6):480–490
- Ma K, Wakisaka M, Sakai K, Shirai Y (2009) Flocculation characteristics of an isolated mutant flocculent *Saccharomyces cerevisiae* strain and its application for fuel ethanol production from kitchen refuse. *Bioresour Technol* 100(7):2289–2292
- Ma H, Yang J, Jia Y, Wang Q, Tashiro Y, Sonomoto K (2016a) Stillage reflux in food waste ethanol fermentation and its by-product accumulation. *Bioresour Technol* 209:254–258
- Ma K, Ruan Z, Shui Z, Wang Y, Hu G, HeM(2016b) Open fermentative production of fuel ethanol from food waste by an acid-tolerant mutant strain of *Zymomonas mobilis*. *Bioresour Technol* 203:295–302

- Mahajan C, Basotra N, Singh S, Di Falco M, Tsang A, Chadha BS (2016) *Malbranchea cinnamomea*: a thermophilic fungal source of catalytically efficient lignocellulolytic glycosyl hydrolases and metal dependent enzymes. *Bioresour Technol* 200:55–63
- Malik K (2019) Simultaneous saccharification and co-fermentation of paddy straw and fruit wastes into ethanol production. *Cellul* 35:72–74
- Munsin R, Laoonual Y, Jugjai S, Imai Y (2013) An experimental study on performance and emissions of a small SI engine generator set fuelled by hydrous ethanol with high water contents up to 40%. *Fuel* 106:586–592
- Nakagawa H, Harada T, Ichinose T, Takeno K, Matsumoto S, Kobayashi M, Sakai M (2007) Biomethanol production and CO₂ emission reduction from forage grasses, trees, and crop residues. *Jpn Agric Res Q* 41(2):173–180
- Ohgren K, Bura R, Lesnicki G, Saddler J, Zacchi G (2007) A comparison between simultaneous saccharification and fermentation and separate hydrolysis and fermentation using steampretreated corn Stover. *Process Biochem* 42(5):834–839
- Pathak PD, Mandavgane SA, Kulkarni BD (2015) Fruit peel waste as a novel low-cost bio adsorbent. *Rev Chem Eng* 31(4):361–381
- Patsalou M, Samanides CG, Protopapa E, Stavrinou S, Vyrides I, Koutinas M (2019) A citrus peel waste biorefinery for ethanol and methane production. *Molecules* 24(13):2451
- Poe NE, Yu D, Jin Q, Ponder MA, Stewart AC, Ogejo JA, Huang H (2020) Compositional variability of food wastes and its effects on acetone-butanol-ethanol fermentation. *Waste Manag* 107:150–158
- Promon SK, Kamal W, Rahman SS, Hossain MM, Choudhury N (2018) Bioethanol production using vegetable peels medium and the effective role of cellulolytic bacterial (*Bacillus subtilis*) pretreatment. *F1000Research* 7:271
- Ranjan A, Khanna S, Moholkar VS (2013) Feasibility of rice straw as alternate substrate for biobutanol production. *Appl Energy* 103:32–38
- Ritslaid K, Küüt A, Olt J (2010) State of the art in bioethanol production. *Agron Res* 8(1):236–254
- Rogalinski T, Ingram T, Brunner G (2008) Hydrolysis of lignocellulosic biomass in water under elevated temperatures and pressures. *J Supercrit Fluids* 47(1):54–63
- Romano RT, Zhang R, Teter S, McGarvey JA (2009) The effect of enzyme addition on anaerobic digestion of Jose tall wheat grass. *Bioresour Technol* 100(20):4564–4571
- Santi G, Crognale S, D'Annibale A, Petruccioli M, Ruzzi M, Valentini R, Moresi M (2014) Orange peel pretreatment in a novel lab-scale direct steam-injection apparatus for ethanol production. *Biomass Bioenergy* 61:146–156
- Sarkar D, Gupta K, Poddar K, Biswas R, Sarkar A (2019) Direct conversion of fruit waste to ethanol using marine bacterial strain *Citrobacter* sp. E4. *Process Saf Environ Prot* 128:203–210
- Sen B, Chou YP, Wu SY, Liu CM (2016) Pretreatment conditions of rice straw for simultaneous hydrogen and ethanol fermentation by mixed culture. *Int J Hydrogen Energy* 41(7):4421–4428
- Simona M, Gianfranco A, Jody G, Paolo B (2013) Energetic assessment of extrusion as pretreatment to improve the anaerobic digestion of agricultural lignocellulosic biomasses. In: Conference Paper: 15th International Conference Ramiran

- Sindhu R, Binod P, Pandey A (2016) Biological pretreatment of lignocellulosic biomass—an overview. *Bioresour Technol* 199:76–82
- Sutjahjo DH (2018) The characteristics of bioethanol fuel made of vegetable raw materials. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol 296. IOP, Bristol, p 012019
- Suwannarat J, Ritchie RJ (2015) Anaerobic digestion of food waste using yeast. *Waste Manag* 42: 61–66
- Szymańska-Chargot M, Chylińska M, Gdula K, Kozioł A, Zdunek A (2017) Isolation and characterization of cellulose from different fruit and vegetable pomaces. *Polymers* 9(10):495
- Taherzadeh MJ, Karimi K (2008) Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *Int J Mol Sci* 9(9):1621–1651
- Tahir A, Aftab M, Farasat T (2010) Effect of cultural conditions on ethanol production by locally isolated *Saccharomyces cerevisiae* BIO-07. *J Appl Pharm* 3(2):72–78
- Tang YQ, Koike Y, Liu K, An MZ, Morimura S, Wu XL, Kida K (2008) Ethanol production from kitchen waste using the flocculating yeast *Saccharomyces cerevisiae* strain KF-7. *Biomass Bioenergy* 32(11):1037–1045
- Thangavelu SK, Ahmed AS, Ani FN (2016) Review on bioethanol as alternative fuel for spark ignition engines. *Renew Sustain Energy Rev* 56:820–835
- Thatoi H, Dash PK, Mohapatra S, Swain MR (2016) Bioethanol production from tuber crops using fermentation technology: a review. *Int J Sustain Energy* 35(5):443–468
- Thongdumyu P, Intrasingkha N, O-Thong, S. (2014) Optimization of ethanol production from food waste hydrolysate by co-culture of *Zymomonas mobilis* and *Candida shehatae* under non-sterile condition. *Afr J Biotechnol* 13(7):866–873
- Tiwari R, Singh S, Nain PK, Rana S, Sharma A, Pranaw K, Nain L (2013) Harnessing the hydrolytic potential of phytopathogenic fungus *Phoma exigua* ITCC 2049 for saccharification of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol* 150:228–234
- Topgül T, Yücesu HS, Cinar C, Koca A (2006) The effects of ethanol–unleaded gasoline blends and ignition timing on engine performance and exhaust emissions. *Renew Energy* 31(15): 2534–2542
- Türköz N, Erkuş B, Karamangil MI, Sürmen A, Arslanoğlu N (2014) Experimental investigation of the effect of E85 on engine performance and emissions under various ignition timings. *Fuel* 115: 826–832
- Uncu ON, Cekmecelioglu D (2011) Cost-effective approach to ethanol production and optimization by response surface methodology. *Waste Manag* 31(4):636–643
- Utama GL, Sidabutar FE, Felina I, Wira DW, Balia RL (2019) The utilization of fruit and vegetable wastes for bioethanol production with the inoculation of indigenous yeasts consortium. *Bulgarian J Agr Sci* 25(2):264–270
- Uzair Ali M, Gong Z, Ali MU, Asmi F, Muhammad R (2020) CO₂ emission, economic development, fossil fuel consumption and population density in India, Pakistan and Bangladesh: a panel investigation. *Int J Financ Econ*
- Vohra M, Manwar J, Manmode R, Padgilwar S, Patil S (2014) Bioethanol production: feedstock and current technologies. *J Environ Chem Eng* 2(1):573–584

- Wadhwa M, Bakshi MPS (2013) Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for generation of other value-added products. *Rap Publication* 4:1–67
- Wan C, Li Y (2010) Microbial pretreatment of corn Stover with *Ceriporiopsis subvermispota* for enzymatic hydrolysis and ethanol production. *Bioresour Technol* 101(16):6398–6403
- Wan C, Zhou Y, Li Y (2011) Liquid hot water and alkaline pretreatment of soybean straw for improving cellulose digestibility. *Bioresour Technol* 102(10):6254–6259
- Web Resource 1: TATA Projects wins order for bioethanol plant in India. (FEB 7, 2020) Biofuel international. <https://biofuels-news.com/news/tata-projects-wins-order-for-bioethanol-plant-inindia/>
- Wei N, Oh EJ, Million G, Cate JH, Jin YS (2015) Simultaneous utilization of cellobiose, xylose, and acetic acid from lignocellulosic biomass for biofuel production by an engineered yeast platform. *ACS Synth Biol* 4(6):707–713
- Wilson K, Lee AF (2014) Bio-based chemicals from biorefining: carbohydrate conversion and utilisation. In: *Advances in biorefineries*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp 624–658
- Wu Y, Wang C, Zheng M, Zuo J, Wu J, Wang K, Yang B (2017) Effect of pH on ethanol-type acidogenic fermentation of fruit and vegetable waste. *Waste Manag* 60:158–163
- Xu QS, Yan YS, Feng JX (2016) Efficient hydrolysis of raw starch and ethanol fermentation: a novel raw starch-digesting glucoamylase from *Penicillium oxalicum*. *Biotechnol Biofuels* 9(1): 1–18
- Yücesu HS, Topgül T, Cinar C, Okur M (2006) Effect of ethanol–gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. *Appl Therm Eng* 26(17–18):2272–2278
- Zabed H, Faruq G, Sahu JN, Boyce AN, Ganesan P (2016) A comparative study on normal and high sugary corn genotypes for evaluating enzyme consumption during dry-grind ethanol production. *Chem Eng J* 287:691–703
- Zhang J, Zhong Y, Zhao X, Wang T (2010) Development of the cellulolytic fungus *Trichoderma reesei* strain with enhanced β -glucosidase and filter paper activity using strong artificial cellobiohydrolase 1 promoter. *Bioresour Technol* 101(24):9815–9818
- Zhao XQ, Zi LH, Bai FW, Lin HL, Hao XM, Yue GJ, Ho NW (2011) Bioethanol from lignocellulosic biomass. In: *Biotechnology in China III: biofuels and bioenergy*, pp 25–51
- Zheng Y, Lin HM, Wen J, Cao N, Yu X, Tsao GT (1995) Supercritical carbon dioxide explosion as a pretreatment for cellulose hydrolysis. *Biotechnol Lett* 17(8):845–850
- Zhuang Y, Hong G (2013) Primary investigation to leveraging effect of using ethanol fuel on reducing gasoline fuel consumption. *Fuel* 105:425–431

تولید بیواتانول از پسماند میوه: پیشرفت‌های اخیر

چکیده: کاهش چشمگیر منابع سوخت فسیلی باعث شده است که انسان‌ها به منابع انرژی تجدیدپذیر وابسته باشند. یکی از این منابع انرژی تجدیدپذیر، بیواتانول است. اتانول یک مایع شفاف است. اتانول از طریق تخمیر مواد بیولوژیکی مختلف به دست می‌آید. این الکل مصارف مختلفی دارد، اما یکی از مصارف آن به طور خاص در حال تبدیل شدن به موضوعی مهم تر است. یکی از مهم ترین سوخت‌های تجدیدپذیر، اتانول است. اتانول، اثرات منفی زیست محیطی ناشی از مصرف جهانی سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد. تولید سوخت اتانول در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است. این امر به این دلیل است که چندین کشور در تلاش برای کاهش واردات نفت، افزایش اقتصاد در مناطق روستایی و بهبود کیفیت هوا هستند. استفاده گسترده از اتانول سوخت در سطح جهانی نیازمند یک فناوری تولید ارزان و سازگار با محیط زیست می‌باشد. ظرفیت‌های تحقیقاتی کنونی به افزایش تولید اتانول سوخت کمک می‌کنند. این ظرفیت‌ها به ویژگی‌های مواد اولیه، مراحل فرآیند و مسائل مهندسی مرتبط هستند. تولید جهانی اتانول به حدود ۲۹/۰۳ میلیارد گالن رسیده است. در حال حاضر، در طول بحران انرژی، تولید اتانول با استفاده از منابع ارزان تر مواد خام و با استفاده از میکروارگانیسم‌های تخمیری کارآمد، راه حلی برای تامین نیاز روزافزون به اتانول می‌باشد. تولید محصولات با ارزش افزوده با استفاده از

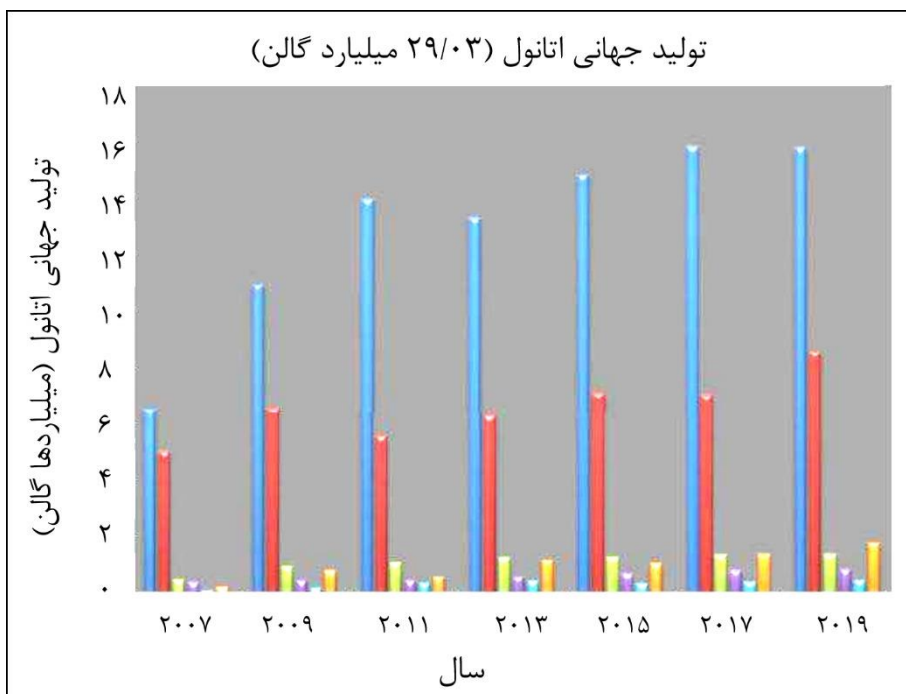
پسماندهای صنایع کشاورزی و واحدهای فرآوری مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر تولید انرژی، آلودگی محیط زیست را مهار می‌کند. مقادیر زیادی پسماند به شکل پوست میوه، دانه، تفاله، لایه سفید مرکبات، هسته و ... توسط صنایع غذایی تولید می‌شود. این پسماند در طبیعت زیست تخریب پذیر هستند. برای تولید بیواتانول، پسماند میوه به عنوان یک ماده لیگنوسلولزی امیدوارکننده عمل می‌کند. این امر به این دلیل است که پسماند میوه در میان منابع تجدیدپذیر و فراوان قرار دارد. بیواتانول با کیفیت خوب از چندین پسماند میوه به دست می‌آید. این پسماند عبارتند از: پوست موز، پسماند انبه، تفاله سیب، پوست نارنگی پاکستانی، پوست پرتقال، تفاله انگور، پسماند خربزه درختی و ... این سوخت را می‌توان در موتورهای برای مقاصد حمل و نقل استفاده کرد و از انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری کرد. انتخاب روش‌های آماده سازی نقش مهمی در بهبود عملکرد نهایی ساکاره سازی آنزیمی دارد. این باعث می‌شود که کل فرآیند از نظر اقتصادی منطقی باشد. استفاده از سلولازهای نو ترکیب برای تولید بیواتانول راهی برای کنترل قیمت آنزیم است.

واژه‌های کلیدی: پسماند میوه، تولید اتانول، سوخت زیستی، بیواتانول، تخمیر، آماده سازی

۹-۱ مقدمه

مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی به آلودگی گسترده منجر می‌شود. این مسئله در مناطق شهری بزرگ به طور واضح قابل مشاهده است. منابع انرژی سازگار با محیط زیست برای یافتن یک جایگزین قابل اجرا و دائمی برای نفت مایع، مورد نیاز است. برای مقابله با این موضوع، در زمان‌های اخیر، سوخت‌های زیستی به بنزین اضافه می‌شود. این امر به کنترل انتشار مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته کمک می‌کند و باعث تشکیل مه دود (یک نوع آلودگی هوا) می‌شود (Wyman 1994). به دلیل کاهش منابع مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، بشر مجبور به وابستگی به منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. یکی از این منابع انرژی بیواتانول است. چندین ماده بیولوژیکی مختلف برای بدست آوردن اتانول که یک الکل مایع شفاف است تخمیر می‌شوند. الکل کاربردهای مختلفی دارد. یکی از کاربردهای آن توجه زیادی را به خود جلب کرده است. یکی از ضروری ترین سوخت‌های قابل تجدید اتانول است. اتانول به کاهش اثرات مضر بر محیط‌زیست که ناشی از استفاده جهانی از سوخت‌های فسیلی، کمک می‌کند (Lalitha and Rajeswari 2011). به دلیل افزایش تقاضا، تولید این الکل به سرعت افزایش یافته است. اتانول مورد تقاضای چندین صنعت است زیرا به عنوان منبع انرژی جایگزین، حلال در صنایع، مواد نگهدارنده و پاک کننده و ضد عفونی کننده عمل می‌کند.

اتانول یکی از پر استفاده‌ترین سوخت‌های زیستی است. این ماده در یک فرآیند مشابه تولید آبجو تولید می‌شود. معمولاً اتانول از طریق سنتز شیمیایی بسترهای پتروشیمی تولید می‌شود. تبدیل میکروبی کربوهیدرات‌های موجود در محصولات کشاورزی نیز به تولید اتانول منجر می‌شود (Dhabekar and Chandak 2010). در زمان حاضر، تولید اتانول به عنوان سوخت اهمیت پیدا کرده است. زیرا چندین کشور به دنبال محدود کردن واردات نفت، رونق بخشیدن به اقتصاد روستایی و تمرکز بر بهبود کیفیت هوا هستند. تولید جهانی اتانول به حدود ۲۹/۰۳ میلیارد گالن رسیده است (شکل ۹-۱). ایالات متحده اولین و برزیل دومین تولید کننده بزرگ در میان بزرگترین تولید کنندگان اتانول سوختی هستند (AFDC 2019). بر اساس یک برآورد، در آینده سوخت‌های فسیلی ما تمام خواهد شد. بنابراین تبدیل زیست توده برای به دست آوردن اتانول سوختی روند صعودی دارد. سه نوع اصلی از مواد اولیه برای تولید اتانول شناخته شده است. تولید اتانول با استفاده از مواد مبتنی بر قند و نشاسته نسبت به مواد لیگنوسلولزی به طور قابل توجهی قابل انجام است. زیرا وجود چالش‌های فنی مانند پیش‌پردازش در مواد لیگنوسلولزی وجود دارد (Petersson et al. 2007).



شکل ۹-۱. تولید جهانی اتانول زیستی برای سال ۲۰۱۹

علاوه بر این، استفاده از فناوری و روش‌های پیشرفته با استفاده از تجهیزات پیچیده و هزینه‌های عملیاتی بالا، یک عامل محدود کننده برای تجاری‌سازی و استفاده آنها در سطح صنعتی در کشورهای در حال توسعه است (Isarankura et al. 2007). تحقیقات بر روی طراحی و بهبود فرآیند تولید سوخت سازگار با محیط زیست برای حمل و نقل با استفاده از مواد اولیه با قیمت مقرون به صرفه تمرکز دارد. در سراسر جهان، مواد خام مختلف مبتنی بر کشاورزی که دارای مقادیر بالایی از کربوهیدرات قابل تخمیر هستند، برای تبدیل زیستی قند به اتانول آزمایش شده‌اند. هنگامی که تولید صنعتی در مقیاس بزرگ با استفاده از فرآیند تخمیر در نظر گرفته می‌شود، هزینه مواد اولیه بر پایه کربوهیدرات عامل محدود کننده است. قیمت مواد اولیه بیش از ۵۵ درصد هزینه تولید است. برای تولید بیواتانول، مواد اولیه ارزان‌تری مانند زیست توده لیگنوسلولزی و پسماند مبتنی بر مواد غذایی کشاورزی در نظر گرفته می‌شوند (Campo et al. 2006). تولید جهانی میوه‌های مختلف و بزرگترین تولیدکنندگان آنها در جدول ۹-۱ نشان داده شده است. تنها راه ممکن برای تولید اتانول با استفاده از مواد خام ارزان، استفاده از میکروارگانیسم‌های تخمیری با کارایی بالا است. با انجام این کار، می‌توان به طور موثر به تقاضای بزرگ اتانول در شرایط کنونی بحران انرژی پاسخ داد (Pramanik and Rao 2010).

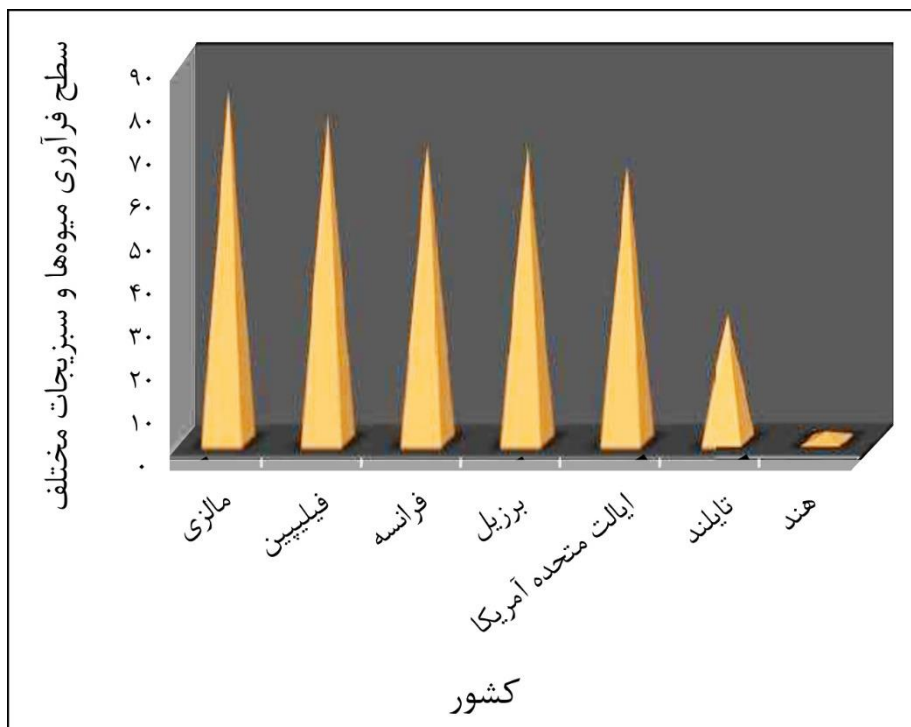
جدول ۹-۱. تولید جهانی میوه‌های مختلف در سال ۲۰۲۰

میوه	تولید	بزرگترین تولید کننده
سیب	۸۶ میلیون تن	چین
انبه	۵۶ میلیون تن	هند
آناناس	۲۸/۲ میلیون تن	کاستاریکا
انگور	۲۳/۳۸ میلیون تن متریک	اسپانیا
موز	۱۵۳ میلیون تن	هند
خربزه درختی	۱۳/۳ میلیون تن	هند
مرکبات	۱۲۴ میلیون تن	برزیل
پرتقال	۷۹ میلیون تن	برزیل

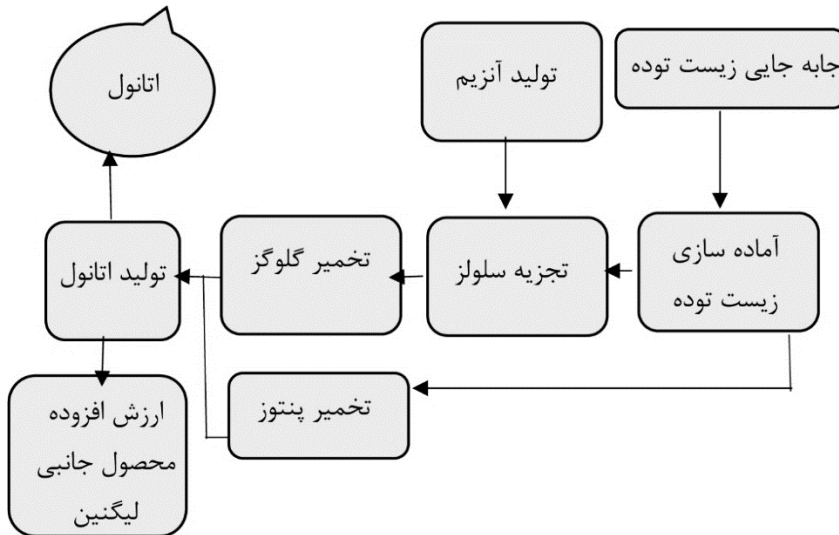
یکی از راهکارهای بالقوه که می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های مربوط به انرژی و ورودی‌های تولید اتانول شود، استفاده از زیست توده میوه‌های رسیده به عنوان ماده خام برای تخمیر و هیدرولیز آنزیمی با استفاده از آنزیم‌های میکروبی است (Hammond et al. 1996). در بین محصولات میوه، هند در زمینه صادرات انبه و موز رتبه اول را در مقایسه با سایر کشورها به خود اختصاص داده است (جدول ۹-۲ و شکل‌های ۹-۲ و ۹-۳).

جدول ۹-۲. رتبه هند در مقایسه با سایر کشورها در زمینه صادرات میوه‌های تازه در سال ۲۰۲۰

رتبه‌بندی هند	میوه
۳۹	سیب
۳	مرکبات
۳	پرتغال
۹	انگور
۱	انبه
۷	خرپزه درختی
۵	آناناس
۱	موز



شکل ۹-۲. سطح فرآوری میوه‌ها و سبزیجات مختلف در سراسر جهان



شکل ۹-۳. نمودار جریان برای تولید بیواتانول

میوه‌هایی که گوشتی هستند، به دلیل ماهیت خود کاملاً مستعد پوسیدگی یا فساد هستند. فساد در هنگام برداشت، در طول دوره انبارداری، در مرحله بازاریابی و همچنین در طول فرآوری آن اتفاق می‌افتد. این امر منجر به پسماند و هدررفت زیادی می‌شود. طبق کتاب داده‌های تحقیقات کشاورزی هند در سال ۲۰۰۴، تولید میوه و سبزیجات در هند حدود ۱۵۰ میلیون تن برآورد شده است. تولید پسماند به حدود ۵۰ میلیون تن تخمین زده شده است. در چنین محصولاتی، تلفات تخمین زده شده تقریباً ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل تولید را شامل می‌شود. این به مجموعه‌ای از تلفات سالانه حدود ۳۰،۰۰۰ ده میلیون روپیه منجر می‌شود. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی (FAO 2003)، میزان کل ضایعات تولید شده از میوه‌ها حدود ۳/۳۶ میلیون تن محاسبه شده است. این رقم بر اساس کل تولید ۱۶/۸ میلیون تن محاسبه شد. این رقم برای موز ۶/۴ میلیون تن بود. عدم موفقیت، عدم قابلیت بازیابی و استفاده مجدد از این مواد با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی منجر به پسماند ناخواسته و کاهش منابع طبیعی می‌شود (Essien et al. 2005). پسماند تولید شده از واحدهای فرآوری مواد غذایی که در طبیعت پسماند جامد هستند، می‌توانند به عنوان مواد خام مفید برای تولید متابولیت‌های ثانویه که از نظر صنعتی برای میکروارگانیسم‌ها اهمیت پیدا می‌کنند، استفاده شوند. پوست میوه‌ها، به عنوان محصول فرعی اصلی پس از فرآوری چندین نوع میوه، به دست می‌آید.

پوست میوه‌ها به عنوان منبع کارآمدی از چندین جزء فعال زیستی هستند که اثرات مفیدی دارند. بخش عمده ای از پوست میوه (نزدیک به ۲۰ تا ۳۰ درصد در مورد موز و نزدیک به ۳۰ تا ۵۰ درصد در مورد انبه) به عنوان پسماند توسط واحدهای فرآوری دفع می‌شود. دفع پسماند منجر به مسائل زیست محیطی مختلفی می‌شود (Zhang et al. 2005). چنین پسماندی که از فرآوری میوه‌ها به دست می‌آیند می‌توانند به عنوان ماده اولیه بالقوه برای تولید بیواتانول استفاده شوند. همچنین می‌تواند به عنوان یک جایگزین مفید برای دفع پسماندهایی که باعث آلودگی می‌شوند عمل کند (Wyman 2001). بعضی از گزارش‌های تحقیقاتی نشان می‌دهند که پسماندهای حاصل از میوه‌ها (موز و انبه) کاربردهای عملی متنوعی دارند. برخی از این کاربردها شامل تولید آنزیم‌های میکروبی که به صورت صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تولید الکل، تولید شراب، تولید سرکه، تولید بیوگاز و استفاده در تغذیه دام می‌باشند (Onwuka et al. 1997). تعداد بررسی‌ها در مورد تولید اتانول از سایر مواد اولیه مانند مواد مبتنی بر ساکارز یا مواد نشاسته ای بسیار اندک است. تولید اتانول از طریق پیش تصفیه آنزیمی با فرآیند ساکارزی کردن پسماند میوه با استفاده از روش‌های تخمیر ساده چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است.

۹-۲ مزایای بیواتانول

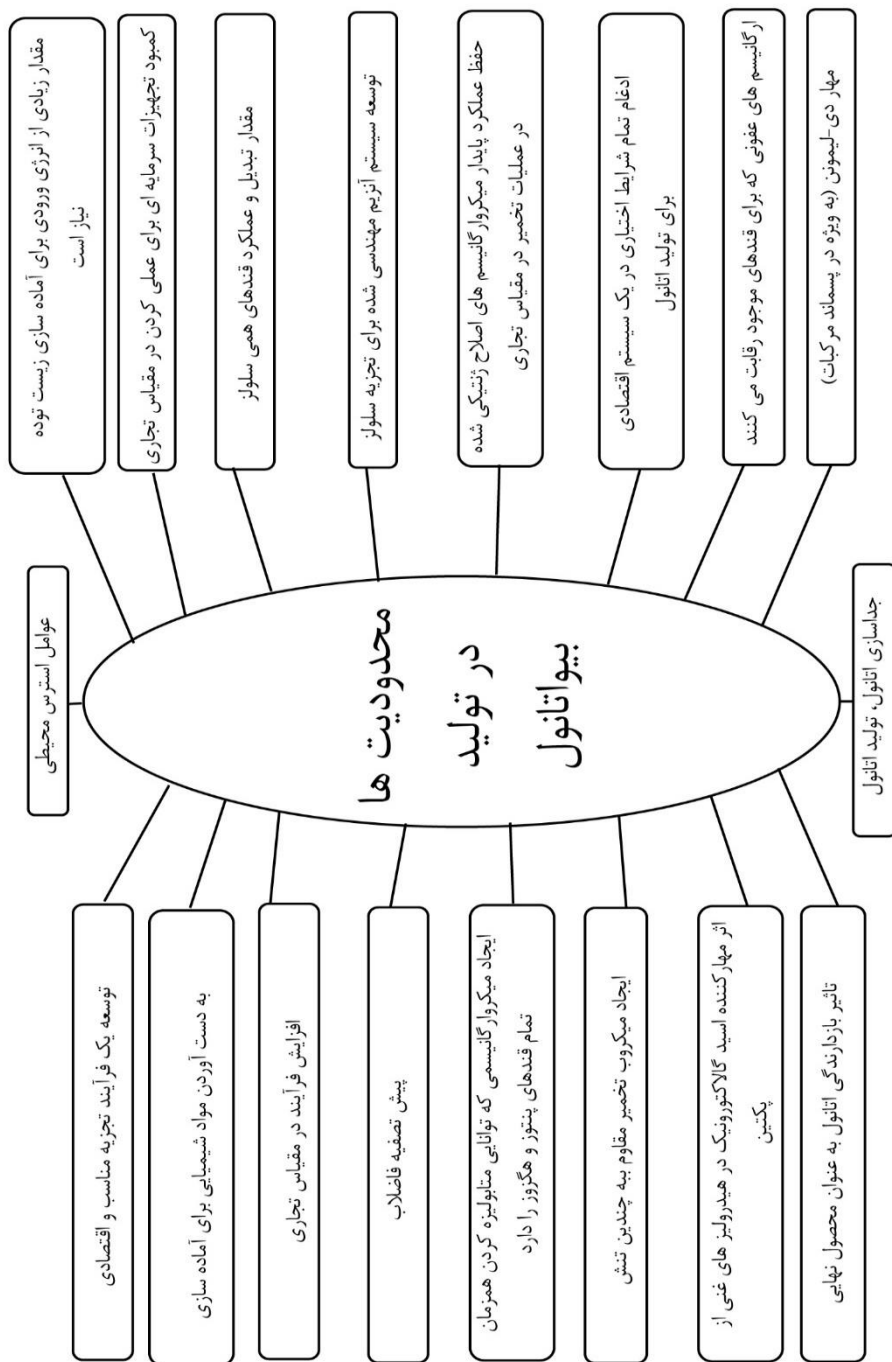
بر اساس مزایای بی شمار اتانول، از آن به عنوان سوخت استفاده می‌شود. مزایا مقادیر انرژی حرارتی کم (تقریباً ۴۵ درصد کمتر در هر گالن در مقایسه با دیزل)، هزینه ارزان تر و انتشار نسبتاً کمتر نسبت به بنزین یا گازوئیل است. نسبت به بنزین، اتانول دارای عدد اکتان بالا (۹۹) است؛ در حالی که برای بنزین این عدد بین ۸۰ تا ۱۰۰ است. به دلیل این خاصیت، در هنگام فشار و حرارت بالا در هنگام احتراق موتور، بنزین ممکن است خودبخود به طور ناخواسته اشتعال کند. اما اتانول در شرایط مشابه، قابلیت اشتعال قبل از زمان ترکیب سوخت و روشن شدن را ندارد. بنابراین اتانول به طور گسترده‌ای به عنوان یک ماده افزودنی سوخت استفاده می‌شود که در رقابت با بنزین قرار دارد. در موارد نادر، از اتانول به صورت خالص استفاده می‌شود (Oliveira et al. 2005).

با استفاده از بیواتانول برای تولید بنزین، تقریباً ۹۰ درصد کاهش انتشار دی اکسید کربن خودروها امکان پذیر می‌باشد (War and Singhs 2010). دولت هند ترکیبی از اتانول (۱۰ درصد) به بنزین استفاده می‌کند. این کار برای دستیابی به کاهش هزینه و مقدار مصرف

بنزین انجام می‌شود. تولید اتانول با استفاده از پسماندهای کشاورزی مختلف از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این به دلیل دسترسی آسان و هزینه‌ی پایین مواد خام است (Mishra et al. 2012). سوخت‌هایی که می‌توانند به عنوان جایگزینی برای بنزین و گازوئیل مورد استفاده قرار گیرند، سوخت‌های زیستی هستند. این سوخت‌های زیستی در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته اند. سوخت‌های زیستی سازگار با محیط زیست و سوخت‌های تجدید پذیر هستند. در نتیجه، سوخت‌های زیستی به عنوان بهترین جایگزین برای موتورهای SI و CI در نظر گرفته می‌شوند. این سوخت‌های زیستی را می‌توان به شکل خالص مورد استفاده قرار داد یا می‌توان آن را با ترکیب با بنزین و گازوئیل برای استفاده در موتورهای IC مورد استفاده قرار داد. مواد اولیه و پسماند کشاورزی معمولاً در دسترس را می‌توان برای تولید سوخت‌های زیستی استفاده کرد. بیودیزل منبع دیگری برای سوخت جایگزین است.

این به طور کلی با استفاده از روغن‌های حیوانی / گیاهی و سوخت متنی بر الکل مانند اتانول تولید می‌شود که به نوبه خود از طریق تخمیر نیشکر یا ذرت به دست می‌آید. این روش در ایالات متحده آمریکا بسیار رایج است. در کشورهایی مانند برزیل، اتانول به یک سوخت رایج تبدیل شده است و در جایگاه‌های سوخت موجود است. شکل مدرن انرژی، زیست توده اتانولی است که از زیست توده به دست می‌آید. این اتانول قابلیت برای تبدیل شدن به سوخت سازگار با محیط زیست برای حمل و نقل برای استفاده در موتورهای بنزینی دارد (Wang 2000). با افزایش قیمت نفت، تولید سوخت‌های بیولوژیکی یک کسب و کار رو به رشد و سودآور است.

با هدف توسعه فناوری‌های نوآورانه برای تولید سوخت‌های بیولوژیکی و بهبود فناوری‌های موجود، ضروری است که چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با سوخت‌های بیولوژیکی در رابطه با امنیت غذایی و نیازهای توسعه سازگار با محیط زیست مورد بررسی قرار گیرد (FAO 2008). طبق گفته Osanaiye Akin و همکاران (2005)، تولید اتانول از طریق تخمیر باید با رقابت زیادی با تولید اتانول از منابع نفتی روبرو شود. اما با افزایش ارزش پتروشیمی، توجه به تخمیر اتانول جلب می‌شود (Ahmeh et al. 1988). از آنجایی که مواد تجدیدپذیر (پسماند) ارزان یا حتی گاهی رایگان است، بنابراین به راحتی در دسترس و کاملاً مقرون به صرفه است. مشکلات خاصی در تولید اتانول وجود دارد که در شکل ۹-۴ نشان داده شده است.



شکل ۹-۴. محدودیت‌های تولید بیواتانول

۳-۹ وضعیت کنونی

در حال حاضر، برای تولید سوخت‌های زیستی مانند اتانول زیستی، بیودیزل، هیدروژن زیستی و متان از زیست توده لیگنوسلولزی استفاده می‌شود. تولید سوخت زیستی با محصولات غذایی موجب کمبود مواد غذایی می‌شود. به همین دلیل، پسماندهای کشاورزی به عنوان منبع تولید سوخت زیستی استفاده می‌شود. پسماند کشاورزی به فراوانی وجود دارد که مشکلات دفع این پسماند وجود دارد. راه حلی برای کاهش رقابت بین محصولات غذایی و سوخت، استفاده از منابع تجدیدپذیر زیست توده لیگنوسلولزی است. با استفاده از این منابع، رقابت بین محصولات غذایی و سوخت کاهش می‌یابد (Mahro and Tim 2007). مواد زیست توده لیگنوسلولزی، مانند چوب، گیاهان علفی و پسماند محصولات کشاورزی، امکان تأمین منبع تجدیدپذیر و قابلیت تولید قندها را به دست می‌دهد. این مواد، از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبتاً مطلوب است و می‌توان از آن برای تولید اتانول استفاده کرد. قابلیت استفاده از مواد لیگنوسلولزی برای تولید بیواتانول به خوبی شناخته شده است. منبع اصلی تولید اتانول کربوهیدرات است. کربوهیدرات به راحتی در بخش‌های مختلف گیاهان یافت می‌شود. در کشور هند، تولید اتانول معمولاً با استفاده از ذرت خوشه‌ای شیرین یا ذرت انجام می‌شود. برای تولید اتانول می‌توان از گیاهان مختلف یا قسمت‌های مختلف آنها مانند؛ نیشکر، گندم، خاک اره و چمن‌های بریده شده باغبانی استفاده کرد. گزارش شده است که منابع طبیعی در دسترس همراه با مخمر ساکارومایسس سروریزه بالاترین پیشنهاد برای تولید تجاری اتانول را تشکیل می‌دهند. تأمین سازگار با محیط زیست انرژی می‌تواند از طریق تبدیل کربن تجدیدپذیر غیرفسیلی، مانند پسماندهای آلی و زیست توده حاوی تمام ماده آلی رشد کننده (گیاهان، علف‌ها، پسماندهای میوه و جلبک‌ها) برای تولید سوخت‌ها تضمین شود (Wyman 1996).

۴-۹ اتانول به عنوان سوخت زیستی برای انرژی تجدیدپذیر

منبع انرژی که با استفاده از مواد آلی یا زیست توده به دست آمده و می‌تواند برای تولید گرما و الکتریسیته استفاده شود یا بتوان از سوخت حمل و نقل استفاده کرد، انرژی زیستی نامیده می‌شود (United Nations 2007). به ویژه، سوخت‌های زیستی مایع مانند اتانول معمولاً به عنوان بیواتانول و بیودیزل نامیده می‌شوند. اینها تولیدکنندگان عمده انرژی زیستی هستند و اغلب در بخش حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرند (United Nations 2007). در زمان حاضر، اتانول مورد استفاده به طور عمده از طریق تخمیر و بعد از آن تقطیر محصولات غذایی غنی از نشاسته مانند ذرت و گندم تولید می‌شود (EPA 2010). هر محصولی که قند قابل تخمیر تولید کند، می‌تواند برای تولید بیواتانول استفاده شود. این محصولات شامل نیشکر،

چغندر قند و بخش‌های مصرف نشده محصولات کشاورزی مانند ضایعات میوه هستند. استفاده از زمین‌های کشاورزی برای کشت محصولات می‌تواند بیواتانول استفاده می‌شوند، می‌تواند منجر به کاهش تولید محصولات غذایی شود و در نتیجه تأثیر منفی بر امنیت غذایی داشته باشد (United Nations 2007). در آینده، این مشکل می‌تواند حل شود، زیرا زیست توده سلولزی مانند درختان و علف‌ها نیز می‌تواند برای تولید اتانول استفاده شود (EPA 2010). لیگنین موجود در ساختار این زیست توده، دسترسی به مواد قابل استفاده برای تولید اتانول را محدود می‌کند (United Nations 2007). در بازار، مخلوطی از اتانول که برای سوخت‌دهی بیشتر خودروها استفاده می‌شود و با نام E10 شناخته می‌شود. این مخلوط همچنین به عنوان گازول^۱ معروف است و شامل ۱۰ درصد اتانول و ۹۰ درصد بنزین است. E85 ترکیبی از غلظت‌های بالای اتانول (۸۵ درصد مخلوط اتانول در بنزین) است. این ترکیب معمولاً استفاده می‌شود. فقط خودروهای چندسوختی (قادر به استفاده از مخلوط‌های مختلفی از اتانول و بنزین) می‌توانند از این مخلوط استفاده کنند (EPA 2010). علاوه بر E85، خودروهای چندسوختی قادر به عملکرد با استفاده از مخلوطی از اتانول و بنزین هستند (EPA 2010). در حالت خالص، اتانول بدون آب به عنوان سوخت استفاده می‌شود و می‌تواند به غلظت نزدیک به ۱۰۰ درصد برسد. به عبارت دیگر، ترکیب اتانول خالص به صورت تقریبی تمام حجم سوخت را تشکیل می‌دهد و هیچ بنزینی به آن اضافه نشده است. استفاده از غلظت بالای اتانول در بنزین مفید است و یکی از مزیت‌های اصلی آن ارزان بودن آن است. در سال ۲۰۰۹، تخمین زده شد که قیمت E85 ۲/۱۳ دلار در هر گالن (به طور متوسط) است. هزینه بنزین معمولی حدود ۲/۶۷ دلار در هر گالن است (EPA 2010). اتانول انرژی کمتری نسبت به بنزین دارد. تخمین زده شده است که خودروهای E85 در مقایسه با خودروهای بنزینی مسافت کمتری را طی می‌کنند (۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر) (EPA 2010). می‌توان نتیجه گرفت که یک خودروی بنزینی با مصرف سوخت ۳۰ مایل در گالن، در صورت مقایسه با یک خودروی مشابه که چندسوختی E85 کار می‌کند، تقریباً ۲۴-۲۱ مایل در گالن مسافت طی می‌کند. اگر هزینه به ازای هر مایل بررسی شود، خودروی با مصرف سوخت ۳۰ مایل در گالن حدوداً ۰/۰۸۹ دلار هزینه برای هر مایل نسبت به خودروی چند سوختی حدوداً ۰/۰۸۹ دلار تا ۰/۱۰۱ دلار هزینه برای هر مایل خواهد داشت. اگرچه قیمت به طور متوسط پایین است، اما مسئله در اینجا سودآوری استفاده از اتانول به عنوان سوخت است. این مسئله را می‌توان به انرژی ای که برای تولید و توزیع اتانول از منبع اصلی آن استفاده می‌شود، ردیابی کرد. منبع اصلی تولید اتانول در حال حاضر محصولات نشاسته‌ای است (EPA 2010). به طور کلی، پنج

1. gasohol

مرحله اساسی در تولید اتانول وجود دارد. این مراحل عبارتند از: (۱) پیش تصفیه محصولات، (۲) استخراج قند، (۳) تخمیر قند برای تولید اتانول، (۴) تقطیر اتانول برای به دست آوردن غلظت بالاتر و (۵) خشک کردن اتانول.

محصول کشاورزی باید در هنگام رشد و برداشت به صورت فیزیکی پردازش، تمیز و به قطعات نازک تقسیم شوند. گاهی اوقات حتی آسیاب شده تا مواد ریز به دست آیند. تولید قندها با روش‌های مختلف از محصولات مختلف انجام می‌شود. می‌توان از آنزیم‌ها یا از روش‌های ساده برای استخراج استفاده می‌شود؛ سپس تخمیر این قندها از طریق مخمرها برای تولید اتانول انجام می‌شود. تقطیر اتانول با استفاده از ستون‌های (متوالی) انجام می‌شود؛ تا اتانول با غلظت بالاتری به دست آید. با افزایش غلظت اتانول، جداسازی اتانول از آب دشوارتر می‌شود. این امر به دلیل شرایط آزنوتروپیک^۱ تعادل بخار-مایع است. این مسئله ظرفیت تقطیر را محدود می‌کند. بعد از آن، اتانول به صورت دیگری خشک می‌شود. این کار به منظور افزایش غلظت کلی اتانول بدون مانع کردن تعادل بخار-مایع انجام می‌شود.

۹-۵ اقتصاد بیواتانول

یکی از ملاحظات اقتصادی بسیار مهم، قیمت سوخت‌های زیستی است. باید یک طرح رقابتی بین سوخت‌های زیستی و همچنین سوخت‌های معدنی مانند دیزل و بنزین وجود داشته باشد. این اطمینان حاصل می‌کند که بازاری برای سوخت‌های زیستی وجود دارد. این امر انگیزه‌ای برای افراد برای تبدیل به یک منبع انرژی تجدیدپذیر ایجاد می‌کند. بنابراین در طی تحلیل دوره‌های کشت محصولات زراعی، بهینه‌سازی هزینه نیز باید مدنظر قرار گیرد (Murphy and Power 2009). تاکنون، قیمت بیواتانول به طور قابل توجهی بالاتر از هزینه‌های مربوط به عرضه بنزین فسیلی بود. برای تشویق تولید و استفاده از بیواتانول در بخش حمل و نقل، باید سیاست‌های ویژه توسط دولت‌های ملی اجرا شود. معمولاً، سه روش زیر برای سیاست‌ها و مقرراتی که پیاده‌سازی سوخت‌های زیستی را حمایت می‌کنند، تعیین شده است:

۱. سیاست‌های مبتنی بر مالیات
۲. سیاست‌ها/یارانه‌های مبتنی بر کشاورزی
۳. تعیین استانداردهای سوخت (Smith 2008)

۱. آزنوتروپ در اصطلاح ترمودینامیک شیمیایی به مخلوط‌هایی گفته می‌شود که با تقطیر ساده قابل جداسازی نباشند.

در حال حاضر، به جای بخش سبز، بخش کشاورزی و گروه‌های تاثیرگذار، توسعه و ترویج سوخت‌های زیستی را ترویج می‌کنند. در واقع، اکثر برنامه‌های سوخت زیستی وابسته به برنامه‌ها و یارانه‌های دولتی هستند. این امر می‌تواند منجر به اعمال اشتباهات بازار شود و هزینه بالایی برای دولت‌ها به همراه داشته باشد. در آینده، در بسیاری از کشورها، با قیمت سازگار با محیط زیست و بالای نفت و پیشرفت فناوری‌های کارآمد و ارزان، سوخت‌های زیستی می‌توانند به عنوان یک جایگزین اقتصادی مطرح شوند (De Fraiture et al. 2008). نوسانات زیادی در قیمت مواد خام وجود دارد. این امر بر هزینه تولید بیواتانول تا حد زیادی تأثیر می‌گذارد (Yoosin and Sorapipatana 2007). حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد از کل هزینه تولید بیواتانول توسط مواد اولیه تأمین می‌شود. فناوری تولید با استفاده از محصولات کشاورزی حاوی قند یا نشاسته به حداکثر توان خود رسیده است و احتمالاً قادر به کاهش قابل توجهی در هزینه تولید نمی‌باشد. در برزیل، بیواتانول به دست آمده از نیشکر حدود ۰/۲۹-۰/۲۳ دلار آمریکا در هر لیتر قیمت دارد (Kojima and Johnson 2005). در اتحادیه اروپا و ایالات متحده آمریکا، هزینه بیواتانول حاصل از شکر و ذرت به ترتیب ۰/۲۹ دلار آمریکا در لیتر (Mitchell 2008) و ۰/۵۳ دلار آمریکا در لیتر است (Christensen and Smith 2008).

از نظر مقدار انرژی تولیدی، هزینه تولید بیودیزل در مقایسه با تولید بیواتانول پایین است. اثر قابل توجهی از قیمت مواد خام بر اقتصاد تولید اتانول از طریق تخمیر وجود دارد. این بدان دلیل است که هزینه مواد اولیه بیش از ۵۰ درصد هزینه تولید را تشکیل می‌دهد (Classen et al. 1999).

بنابراین تأمین مواد خام ارزان قیمت برای کاهش هزینه تولید بسیار مهم است. بیشتر پسماندها (مثل میوه‌ها و سبزیجات) که از صنایع فرآوری حاصل می‌شوند، فصلی هستند. در نتیجه، تجزیه آنها به سرعت اتفاق نمی‌افتد (اگر پسماندها به سرعت تجزیه می‌شدند، می‌توانستند به عنوان مواد خام ارزان‌تر برای تولید سوخت بیولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند). پوست انبه، مرکبات، گوجه فرنگی، آناناس و ... این پسماند را تشکیل می‌دهند. وقتی این پسماندها به صورت مکانیکی خشک می‌شوند، می‌توانند در طول سال نگهداری شوند. مخمر ساکارومایسس سرویزیه و باکتری *زایموموناس موبیلیس* گزینه‌های مطرح برای تولید الکل به صورت صنعتی هستند. با توجه به بازده اتانول و مقاومت، باکتری *زایموموناس موبیلیس* نسبت به مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* مزیت‌های بیشتری دارد. از نظر تجاری، تولید اتانول با استفاده از مخمر انجام می‌شود. این به دلیل این است که مخمر قادر است گلوکز را به اتانول تبدیل کند و به عنوان تنها محصول در فرآیند تخمیر عمل کند. همچنین، مخمر به دلیل

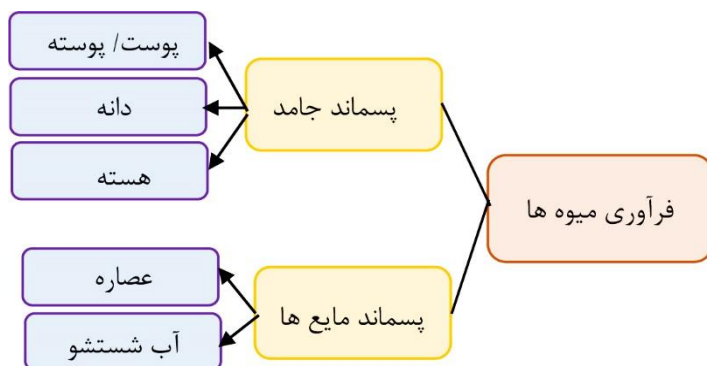
تحمل بالای اتانول و سرعت تخمیر سریع آن مشهور است. علاوه براین، مخمر به غلظت بستر و دما حساس نیست (Linden and Hahn-Hägerdal 1989). زهو و همکاران (2007) اقتصادی را که در تولید اتانول از پوست مرکبات را تجزیه و تحلیل و بررسی کردند. به عنوان یک مرجع، مدل اقتصادی استفاده شده در فرآیند سلولز به اتانول استفاده شد. هزینه پروژه و هزینه عملیاتی (ثابت) برای فرآیند تبدیل پوست مرکبات به اتانول، برآورد شد. برآورد شده که هزینه تولید اتانول مرکبات تقریباً ۱/۲۳ دلار بر گالن بود. این مقدار بالاتر از هزینه تولید اتانول از ذرت (۱ دلار بر گالن) بود، اما هزینه تولید اتانول از ذرت کمتر از تولید اتانول از سلولز (تقریباً ۱/۶۲-۱/۳۵ دلار بر گالن) بود. تأثیر اقتصادی تبدیل زایلوز به اتانول برای کارخانه تولید اتانول از چوب مورد بررسی قرار گرفت. برآورد شد که حداکثر قابلیت کاهش در هزینه اتانول با استفاده از زایلوز، هزینه تولید اتانول از ۱/۶۵ دلار بر گالن به ۱/۲۳ دلار بر گالن کاهش خواهد یافت (Hinman Norman et al. 1989). حساسیت مربوط به هزینه اتانول به عواملی نظیر بازده، غلظت اتانول و نرخ تخمیر زایلوز مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه گرفته شد که هزینه اتانول به طور اصلی تحت تأثیر نوسانات بازده و غلظت اتانول قرار می‌گیرد، در حالی که نرخ تخمیر کمترین اهمیت را دارد.

تجزیه و تحلیلی از چندین بیوکاتالیست مرتبط با تبدیل زایلوز انجام شد. بهترین مخمرهایی که برای این منظور شناسایی شدند، شامل مخمر *کاندیدا شحاتا*^۱ و مخمر *پچیا استیپیت* بودند. بر اساس اطلاعات انجمن سوخت‌های تجدیدپذیر، صنعت اتانول در سال ۲۰۰۴ در بخش‌های مختلف اقتصاد آمریکا حدود ۱۴۷۰۰۰ شغل ایجاد کرد. بیش از ۲ میلیارد دلار به عنوان درآمد مالیاتی به دولت در تمام سطوح ارائه شد. وزارت انرژی ایالات متحده تخمین زده است که به ازای هر یک میلیارد گالن اتانول تولید شده، ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ شغل ایجاد می‌شود.

۹-۶ انواع پسماند میوه

صنایع مرتبط با غذا مقادیر زیادی از پسماندها تولید می‌کنند. این پسماند به صورت پوست، دانه، تفاله، هسته، تفاله‌های الیاف میوه و ... هستند (شکل ۹-۵). این پسماندها در طبیعت قابل تجزیه بوده و حاوی مقدار زیادی کربوهیدرات هستند. تولید محصولات فرآوری شده میوه نیز در حال افزایش است. بنابراین مقدار پسماندی که از صنایع مرتبط بدست می‌آید، نیز به همان اندازه در حال افزایش است. مقادیر بزرگی از این پسماندها منجر به مشکلات دفع می‌شوند، زیرا آلودگی محیطی ناشی از دفع آن‌ها باید کنترل شود.

1. *C. shehatae*



شکل ۹-۵. انواع مختلف پسماند تولید شده در هنگام فرآوری میوه ها

تولید فرآورده‌های مفید از این پسماندها، تنها راهکار مناسب برای دفع مؤثر آن‌ها است. صنایع فرآوری مرتبط با میوه‌ها و سبزیجات مقادیر بزرگی از پساب‌ها و پسماندهای جامد تولید می‌کنند. در پساب‌ها بار آلی بالایی وجود دارد. علاوه بر این، مواد پاک‌کننده و سفیدکننده، جامدات معلق مانند ذرات خاک و برخی از الیاف وجود دارند. همچنین، احتمال وجود باقیمانده‌های آفت‌کش‌ها که از مواد خام شسته می‌شوند نیز وجود دارد.

پسماند اصلی جامد، مواد آلی است. این مواد شامل میوه‌ها و سبزیجاتی است که دور انداخته می‌شوند. مشکلات مربوط به بوی نامطبوع در صورت مدیریت نامناسب پسماند جامد و پساب‌ها مشاهده می‌شود. این مشکلات همچنین در فرآیند فرآوری پياز یا در آماده سازی وعده‌های آماده مصرف نیز مشاهده می‌شود. بیشتر پسماندهای میوه و سبزیجات که از صنایع مرتبط با فرآوری بدست می‌آیند، به صورت فصلی هستند. بنابراین تجزیه و تفکیک سریع آنها اتفاق نمی‌افتد. هنگامی که این پسماندها به صورت مکانیکی خشک می‌شوند، این مواد مانند پوست مرکبات، پوست انبه، پوست آناناس و پسماندهای فرآوری گوجه فرنگی می‌توانند در طول سال نگهداری شوند (Reddy et al. 2011). بعد از استفاده از میوه‌ها، دو نوع پسماند تولید می‌شود. یک نوع پسماند جامد است که شامل پوست یا پوسته، دانه‌ها، هسته و ... می‌شود، در حالی که نوع دیگر پسماند مایع است که شامل آبمیوه و آب شستشو است (Hemalatha 2012). در برخی از میوه‌ها، قسمت دور ریخته شده می‌تواند بسیار زیاد باشد. به عنوان مثال: در انبه حدود ۳۰-۵۰ درصد، در موز ۲۰ درصد، در آناناس ۴۰-۵۰ درصد و در پرتقال نیز ۳۰-۵۰ درصد از میوه پس از مصرف دور ریخته می‌شود. از این رو، یک مسئله رایج اما جدی دفع زباله وجود دارد. این می‌تواند منجر به مشکلات موش‌ها و مگس‌ها در داخل و اطراف مکان پردازش شود.

در صورتی که برنامه‌ای برای استفاده از پسماند وجود نداشته باشد، باید آن را یا دفن کرد یا در تغذیه حیوانات استفاده کرد. این کار باید دور از محل پردازش انجام شود.

یکی از دغدغه‌های اصلی در مدیریت پسماند میوه‌ها، کیفیت میکروبیولوژی در این نوع پسماندها می‌باشد. بنابراین پسماندی که در همان روز تولید شده است، فقط باید استفاده شود. توصیه نمی‌شود پسماندها را برای استفاده در پایان هفته ذخیره کنید. یکی از نکات مهم در تولید محصولات ارزش افزوده با استفاده از پسماندها، استفاده از پسماندهای حاصل از فرآوری مواد غذایی و صنعت کشاورزی است. این روش منجر به کاهش آلودگی محیطی و تولید انرژی می‌شود. سالانه ۱/۰۵ میلیارد تن از این زباله‌ها در دسترس است (Anonymous 2004). به طور کلی، اکثریت این مقدار دفع می‌شود. این امر باعث افزایش آلودگی در محیط زیست می‌شود. از آنجایی که هزینه‌های حمل و نقل سنگین در این امر دخیل است، فرایند دفع نیز به یک مرحله گران تبدیل می‌شود. تولید سالانه پوست انبه در هند تقریباً حدود ۰/۴ تا ۰/۶ میلیون تن است (Anonymous 2004). این زباله‌ها یا به عنوان خوراک دام استفاده می‌شود یا در فضای باز تلنبار می‌شود. تلنبار منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود. فرآوری انبه به حداکثر میزان انجام می‌شود. این امر منجر به تولید پسماند جامد و مایع با کیفیت بالا می‌شود. در حین تهیه مواد اولیه، پسماند جامد (هسته، ساقه و پوست) و مواد الیافی به دست می‌آید. این حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد کل پسماند میوه را تشکیل می‌دهد. از این مقدار، ۵ تا ۱۰ درصد از پسماند گوشت میوه و ۱۵ تا ۲۰ درصد آن را هسته تشکیل می‌دهد (Anonymous 2004; Madhukara et al. 1993; Pandey et al. 2000). مایعی که پس از شستشوی میوه، بسته بندی، نرم کردن بافت میوه، خنک کردن و پس از تمیز کردن دستگاه‌ها و تجهیزات به دست می‌آید، پسماند مایع نامیده می‌شود. استفاده از این پسماند انبه هم ضروری و هم چالش برانگیز است. صنعتی که ۵ تن انبه (از نوع توتاپوری)^۱ را در یک ساعت فرآوری می‌کند، پس از ۸ ساعت کار روزانه ۶ تن پوست تولید می‌کند. در فرایند تولید آب پرتقال، تقریباً نیمی از وزن میوه به عنوان پسماند دور ریخته می‌شود. پسماندها شامل پوست، دانه‌ها، و زیکول‌های آب پرتقال و غشاها هستند (Braddock 1999). در حال حاضر، این پسماندها (جامدات) در مناطق خاک نزدیک به محل تولید پخش می‌شوند. این کار به عنوان آخرین استفاده از مواد خام برای تغذیه دام یا سوزاندن آنها انجام می‌شود (Garcia-Castello et al. 2006). این روش برخورد با پسماندها منجر به نشت شیرابه در

۱. در مورد انبه، توتاپوری به یک رقم خاص از انبه اشاره دارد. یکی از ارقام محبوب و پرکشت انبه است که معمولاً در مناطق جنوبی هند پرورش داده می‌شود.

خاک و آب زیرزمینی می‌شود که کنترل نشده است. این امر منجر به افزایش مقادیر اجزای آلی می‌شود که به طور جدی محیط زیست را تهدید می‌کند.

در مناطق گرمسیری و مرطوب، تولید روغن خوراکی، از درختان نخل روغنی با استفاده از کشت گسترده انجام می‌شود (Yong et al. 2007). هنگامی که میوه‌های قرمز رنگ درختان نخل روغنی در دسته‌های بزرگ رشد می‌کنند، باقی مانده‌های میوه پس از استخراج که تقریباً ۲۰ درصد از کل جرم زیستی نخل روغنی را تشکیل می‌دهد، در طول فرآیند استخراج روغن حذف می‌شود. هر ساله در مالزی و در سراسر جهان به ترتیب حدود ۱۴/۹ و ۳۷/۷ میلیون تن از باقیمانده‌های میوه پس از استخراج تولید می‌شود (Akhtar et al. 2010). این باقیمانده‌ها دارای فراوانی سلولز و همی سلولز هستند. این بخش‌ها به راحتی قابل هضم نیستند. این باقیمانده‌ها مواد اولیه‌ای هستند که باید در معرض تصفیه زباله در صنعت نخل قرار گیرند.

۹-۷ پسماند میوه (پیش نیاز) مناسب برای تولید اتانول

تولید بیواتانول را می‌توان با استفاده از مواد اولیه مختلف انجام داد. این مواد خام به طور کلی به سه دسته مختلف طبقه بندی می‌شوند: (۱) مواد اولیه حاوی ساکارز (نیشکر، ذرت خوشه ای شیرین، چغندر قند)، (۲) مواد غنی از نشاسته (ذرت، گندم، سیب زمینی) و (۳) مواد حاوی لیگنوسلولز (علف ها، چوب). مسئله اصلی بیواتانول تامین مواد اولیه برای تولید است. علاوه بر این، هزینه مواد اولیه نوسان دارد؛ بنابراین تأثیر زیادی بر هزینه تولید بیواتانول دارد. این روزها، کار تحقیقاتی بر روی زیست توده لیگنوسلولزی متمرکز شده است. این یکی از بالقوه ترین مواد اولیه به دلیل عرضه و قیمت پایین آن است (Prados et al. 2010). پسماندهای میوه به عنوان ماده لیگنوسلولزی مناسبی برای تولید بیواتانول عمل می‌کنند. این امر به دلیل این است که ماده لیگنوسلولزی منبعی فراوان و قابل تجدید هستند.

برای تولید اتانول، بهترین منابع مواد خوراکی مقادیر قند بالا هستند. این منابع شامل نیشکر، میوه‌ها، چغندر قند، و محصولات جانبی کارخانه‌های تولید قند هستند. این امر به این دلیل است که قند عنصر اصلی این مواد است و به راحتی قابل تبدیل شدن به اتانول می‌باشد (Ensinas et al. 2009). با توجه به لیگنین کمتر و محتویات قند فراوان، چنین باقیمانده‌های مبتنی بر میوه می‌توانند در مقایسه با مواد اولیه مقاوم بر پایه لیگنوسلولزی مانند کاه برنج، ذرت و کاه گندم، پیش نیاز امیدوارکننده‌ای برای تولید اتانول باشند. بخشی از پلی ساکاریدهای نامحلول نیز در باقیمانده‌های میوه وجود دارد. این شامل سلولز، همی سلولز و پکتین است. اینها

می‌توانند به وسیله آنزیم‌های هیدرولیزی مانند سلولاز و پکتیناز به صورت آنزیمی هیدرولیز شوند تا قندها بدست آید (Wilkins et al. 2007c). در فرآیند تبدیل زیست توده به اتانول، تنوع ماده اولیه به معنای وجود انواع مختلف باقیمانده‌های میوه است که قابل استفاده در تولید اتانول هستند.

در مرحله دسته‌بندی، پسماند موز به دلیل عدم استفاده، دور ریخته می‌شوند. از زیست توده موز به عنوان ماده اولیه، می‌توان بیواتانول تولید کرد (Hossain et al. 2011). تقریباً ۳۰ درصد از میوه‌های موزی که در استرالیا برداشت می‌شوند، در همان مرحله بسته‌بندی به دلیل معایبی که دارند، قابل استفاده نیستند و دور ریخته می‌شوند (Clarke et al. 2007). پسماند موز که به دلیل نقص مصرف نمی‌شوند، معمولاً به عنوان ضایعات دور ریخته می‌شوند. این باعث آلودگی منابع آب می‌شود. این تخلیه همچنین می‌تواند منجر به مسائل زیست محیطی شود و بر سلامت موجودات زنده تأثیر بگذارد (Tock et al. 2009). از این رو، برای بررسی مسائل زیست محیطی ناشی از تجزیه زباله، تولید انرژی با استفاده از پسماند موز به عنوان منبع تولید سوخت زیستی مفید است.

در میوه‌های موز و زیست توده باقیمانده مرتبط با آن‌ها موادی مانند آمیلاز و لیگنوسولولزی وجود دارد. بنابراین نیاز به هیدرولیز آن‌ها برای تبدیل آن‌ها به گلوکز وجود دارد. این گلوکز بیشتر برای بدست آوردن اتانول تخمیر می‌شود (Carrasco et al. 1992; Kumakura and Xin 1993). در گوشت موز مقادیر بالایی از نشاسته (۵۳/۲ درصد وزنی به وزنی) وجود دارد. این باعث می‌شود که موز یکی از مواد مناسب برای انجام هیدرولیز اسیدی باشد. ساقه‌های گل مقادیر بالایی از سلولز (۴۰/۹ درصد وزنی به وزنی) را نشان می‌دهند. از این رو، بهترین ماده خام برای انجام هیدرولیز آنزیمی است. پوست موز دارای ارزش حرارتی کمتری است. بنابراین می‌توان آن را به عنوان یک ماده اولیه مناسب برای استفاده به عنوان سوخت در کارخانه آب و برق در نظر گرفت. سیستم‌های تولید موز و موز رسیده به دلیل تقاضای بالای بازار از نظر کیفیت منجر به تجمع مقدار قابل توجهی دور ریختنی می‌شود. میوه‌های رسیده دارای مقدار زیادی قند هستند که می‌توانیم به راحتی آن‌ها را برای به دست آوردن اتانول پردازش کنیم (Sophie et al. 2011).

یک پسماند کشاورزی غنی از پکتین پوست لیمو است. این یک منبع مواد اولیه خوب برای تولید بیواتانول است. این امر دلیل مقادیر بالای کربوهیدرات آن است (Marín et al. 2007; Boluda-Aguilar et al. 2010; Mielenz et al. 2009). تولید اتانول با استفاده از پوست پرتقال توسط گرومن و همکاران (1994) اثبات شد. تولید اتانول با استفاده از میوه‌های موز

(Manikandan et al. 2008) و پوست آناناس (Ban-Koffi and Han 1990) انجام شده است. تجزیه پوست انبه دشوار است. به دلیل ترکیب پیچیده پوست انبه، تجزیه آن زمان زیادی صرف می‌شود. گزارش‌هایی در رابطه با تخمیر اتانول با استفاده از پسماند میوه‌ها و سبزیجات مانند پوست انبه وجود دارد که بازده خوبی دارد. مقادیر مناسبی از قندهای کاهنده در پوست انبه خشک و تازه وجود دارد. این باعث استفاده از آن به عنوان ماده خام برای تولید اتانول و توسعه محیطی ارزان می‌شود. میوه انبه (مانژیفرا اندیکا (L. var. Criollo^۱ دارای مقدار تجمعی کربوهیدرات است که در زمان رسیدگی از ۱۴ تا ۱۶ درصد متغیر است. سرشار از ویتامین‌های A و C، مواد معدنی، فیبر و آنتی اکسیدان است. برای تخمیر، تفاله انبه بستر مناسبی است. این مقدار کربوهیدرات خوبی دارد و به راحتی در مکزیک یافت می‌شود. در گوشت انبه، قندها به صورت قابل تجزیه موجود هستند. بنابراین سلول‌های مخمر قادرند مقادیر قندها را به طور مستقیم تجزیه کنند. این مواد اقتصادی هستند (Lin and Tanaka 2006).

از بین پیش نیازهای مختلف، بادم هندی به عنوان یک بستر ارزان برای تولید اتانول در نظر گرفته می‌شود (Rocha et al. 2007). نویسندگان مختلف استفاده از پرتقال، نارنگی، آناناس تلخ و پسماند پوست مرکبات را برای تولید بیواتانول گزارش کرده‌اند (Grohmann et al. 1994, 1995a, b; Wilkins et al. 2007a, b, c; Talebnia et al. 2008; Wilkins 2009; Boluda-Aguilar et al. 2010).

پسماند کنسروسازی آناناس پیش نیازهای امیدوارکننده‌ای برای به دست آوردن اتانول هستند. آنها شامل قندها، ویتامین‌ها، پروتئین‌ها و سایر عوامل رشد است. این می‌تواند منجر به کاهش هزینه دفع پسماند شود (Chye and Meng 1975; Prior et al. 1980; Alain et al. 1987)، زیرا کارخانه کنسروسازی قبل از دفع آنها باید پسماندها را پیش‌پردازش کند تا بار آلی را کاهش دهد. در صنعت بزرگ تولید آب سیب، حدود ۷۵ درصد از سیب‌ها برای آب میوه استفاده می‌شود، در حالی که ۲۵ درصد بقیه را محصولات جانبی (مانند تفاله سیب) تشکیل می‌دهند. در هند سالانه بیش از ۵۰۰ واحد صنعتی که با فرآوری سیب سروکار دارند، ۱/۳ میلیون تن تفاله سیب تولید می‌کنند. این کار سالانه ده میلیون دلار هزینه برای دفع دارد. معمولاً تفاله سیب را فقط در زمین‌های باز قرار می‌دهند. این باعث آلودگی محیط زیست می‌شود. از کل مقدار تفاله سیب تولید شده (که به طور تخمینی حدود ۱۰۰۰۰ تن است)، فقط یک بخش کوچک از آن استفاده می‌شود. تفاله یکی از قسمت‌های میوه است. بنابراین تفاله

۱. نام یک گونه از سرده انبه‌ها است. این درخت بومی شبه قاره هند است.

سیب قادر است به عنوان مواد اولیه برای تولید محصولات مصرفی و صنعتی متنوع استفاده شود. تفاله غنی از کربوهیدرات (۱۱/۸ گرم)، پکتین (۱۶/۹۵ گرم)، فیبر خام (۲/۳ گرم) و مواد معدنی (۰/۳ گرم) است (مقدار در هر ۱۰۰ گرم). در نتیجه، تفاله سیب دارای مقادیر متنوعی از مواد مغذی است (Mahawara et al. 2012).

تولید بیواتانول با استفاده از تفاله سیب یک گزینه خوب است. زیرا با نرخ ارزان عرضه می‌شود و حداقل نیاز به زمین وجود دارد. در فرآیند تولید در آزمایشگاه، وابستگی به شرایط آب و هوایی خارجی وجود ندارد، تنها شرط لازم پیشرفت تخمیر است. بسیاری از مطالعات با تولید اتانول زیستی از طریق ساکارزی کردن و تخمیر همزمان تفاله سیب یا به تنهایی (Hang et al. 1982; Ngadi and Correia 1992) یا همراه با محصولات جانبی کارخانه‌های تولید قند (Kaur 1989) و یا استفاده از ساکارزی کردن و تخمیر همزمان تفاله سیب سروکار دارند (Hang 1988).

چندین مطالعه منتشر شده است که در آن پسماند پوست مرکبات به اتانول تبدیل شده اند (Grohmann et al. 1994, 1996; Oberoi et al. 2010; Wilkins et al. 2007a, b). پسماند پوست مرکبات برای تولید محصولات خاصی که از نظر تجاری مهم هستند، استفاده می‌شود. این مواد شامل اتانول، آنزیم‌ها، زیست توده میکروبی، اسیدهای آلی، ترکیبات طعم‌دهنده فرار، و آنتی اکسیدان‌ها است (Dhillon et al. 2004). در میان بسترهای ارزان‌تری که به آسانی برای تولید استون- بوتانول- اتانول در دسترس هستند، میوه خرمای فاسد انتخاب خوبی است (Mohamed and Abdel-Wahab 2012). اکثر آناناس‌ها به صورت تازه یا به عنوان میوه فرآوری شده (به طور کلی کنسرو شده) مصرف می‌شوند. فقط میوه‌های با بهترین کیفیت برای پردازش و حمل و نقل برداشت می‌شوند (Tanaka et al. 1999). بازار مناسبی برای مواد غذایی بی کیفیت وجود ندارد. بنابراین در مزارع پوسیده می‌شود. بخش عمده ای از آناناس‌ها برای به دست آوردن آب میوه در معرض پردازش قرار می‌گیرند. این باعث تولید مقدار زیادی گوشت میوه پسماند می‌شود. چنین زباله‌هایی غیرقابل استفاده هستند. این پسماند که ماهیت گوشتی دارند، علاوه بر بخش‌های نشاسته و همی سلولز، همچنان دارای مقدار قابل توجهی ساکارز هستند. از این رو، پیش بینی می‌شود که آب میوه‌های استفاده نشده و سایر پسماند می‌تواند برای یک فرآیند تخمیر برای تولید اتانول استفاده شود.

پوست پسماند موز و چغندر، پسماند رایج کشاورزی هستند. این پسماند دارای مقادیر

کربوهیدرات غنی هستند. آنها همچنین دارای سایر مواد مغذی اساسی هستند که از رشد میکروبی حمایت می‌کنند (Dhabekar and Chandak 2010). در کشور نیجریه، میوه خربزه درختی به عنوان یک میوه رایج مصرف می‌شود که به عنوان ماده غذایی و به علاوه، محصول دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این میوه به صورت تازه مصرف می‌شود یا پس از پردازش به عنوان دسر مصرف می‌شود (Desmond 1995). میوه نارس و رسیده خربزه درختی، برای تولید پاپائین^۱ استفاده می‌شود. این کار با ایجاد برش‌ها در پشت میوه انجام می‌شود تا شیره مورد نیاز برای تولید پاپائین استخراج شود. مقادیر زیادی از پسماند خربزه درختی از طریق باغ‌هایی که برای استخراج پاپائین کشت می‌شوند، به دست می‌آیند. دفع آنها یک مسئله نگران‌کننده است. بنابراین آزمایشی برای پردازش این پسماند برای به دست آوردن اتانول با کاربرد صنعتی انجام شد (Osanaïye Akin et al. 2005).

تفاله انگور به عنوان یک محصول زائد با ارزش اقتصادی بسیار کمتر در نظر گرفته می‌شود. تجزیه و تحلیل شیمیایی تفاله انگور مقادیر قابل توجهی از قند را نشان داد که می‌تواند تخمیر شود. جمع آوری این قندها پس از تحت فشار قراردادن آناناس تلخ انجام می‌شود. برای به دست آوردن اتانول، هیدرولیز چنین پلی ساکاریدهای پیچیده می‌تواند انجام شود. آزمایش‌های پیوسته روی پیش نیازهای جدید از طریق تخمیر برای به دست آوردن اتانول انجام می‌شود (Pimentel and Patzek 2005; Teles et al. 2007; Ye et al. 2007; Hossain and Fazlîny 2010; Oyeleke and Jibrin 2009).

۸-۹ آماده سازی پسماند میوه برای تولید اتانول

پسماند میوه به عنوان یک منبع لیگنوسلولزی خوب برای تولید بیواتانول عمل می‌کند. زیرا این منابع به عنوان منابع تجدیدپذیر فراوان در دسترس هستند. انتخاب روش برای پیش تیمار نقش مهمی در افزایش کارایی فرآیند ساکاره سازی آنزیمی ایفا می‌کند، بنابراین کل روش را مقرون به صرفه می‌کند (Senthilguru et al. 2011). شرایط پیش تصفیه بهینه برای راندمان بالاتر برای تولید اتانول با استفاده از پوسته زیست توده باقیمانده میوه توسط لالیتا و همکاران (2011) مورد بررسی قرار گرفت. پسماندها، ابتدا پیش پردازش پراکسید هیدروژن (قلیایی) و سپس با پیش پردازش اسید سولفوریک مورد تصفیه قرار گرفتند. پس از آن سه هفته تخمیر با

استفاده از قارچ فوزاریوم سولانی^۱ انجام شد. روش آماده سازی منجر به حذف موثر لیگنین شد. تولید اتانول در نمونه‌های کشت با استفاده از کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا مشاهده شد. با اعمال پیش پردازش قلیایی با استفاده از H_2O_2 (۲ درصد) با pH برابر با ۱۳ و خیساندن به مدت ۸ ساعت، ۴۵ درصد لیگنین حذف شد. مقدار اتانول به دست آمده ۱۱۵ میلی گرم بر لیتر بود. با استفاده از پیش پردازش اسیدی با استفاده از ۰/۲ مول بر لیتر H_2SO_4 در طول ۱۵ روز تخمیر، بیواتانول به دست آمده در یک روز ۱۲ گرم بر لیتر بود. حذف قابل توجه لیگنین از باقی مانده‌های دارای پوست زیست توده میوه منجر به تولید مقدار زیادی اتانول شد.

زمانی که کارخانه کنسرو سازی آناناس به صورت مکانیکی خرد و فشرده شد، آب کدر به دست آمد. این منجر به تولید نزدیک به ۴۵۰-۵۰۰ لیتر آب میوه شد (Nigam 1999). آبهای مخلوط با آبمیوه، پوسته‌ها، پسماند سلولزی و سایر مواد مایع به دست آمده در مراحل مختلف فرآوری با موارد فوق (آب کدر) مخلوط شده و تحت یک پردازش کوتاه در دمای بالا (در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۵ دقیقه) قرار گرفتند. پس از خنک شدن و سانتریفیوژ کردن (۱۵ دقیقه)، مایع شفاف به دست آمد. استفاده از دمای بالا به طور قابل توجهی باعث کاهش کل مواد جامد شد. همچنین، تعداد میکروب‌ها را نیز کاهش داد. پوست مرکبات لیمو به قطعاتی با اندازه کمتر از ۷ میلی متر خرد شد. سپس این قطعات در یک راکتور فشاری (HRS Spiratube، مدل T-Sensation با ظرفیت ۱۲ لیتر) قرار گرفتند تا عملیات پیش پردازش بخار تحت فشار را انجام شود (Boluda-Aguilar and López-Gómez 2013).

چنین آماده سازی‌های راکتوری و تقریباً مشابه بخار تحت فشار با پسماند پوست مرکبات نارنگی انجام شد و توسط Boluda-Aguilar و همکارانش ثبت شد (2010). بعد از هیدرولیز حرارتی، بخار کامل (تقریباً با فشار مطلق ۶ بار) تخلیه شد. این عمل به منظور کاهش سریع فشار در راکتور انجام شد. همچنین، این عمل منجر به کاهش سریع فشار بخار آب در زیست توده شد. این امر، باعث شکست دیواره‌های سلولی می‌شود. طبق یافته‌های بولودا-آگویلار و همکاران (2010)، آزمایشات مربوط به بخار تحت فشار در شرایط مرطوب انجام شد (با نسبت آب به زیست توده ۱:۲ وزنی به وزنی، که معادل غلظت ماده خشک تقریباً ۱۴ درصد است). زمان واکنش ۵ دقیقه بود و بخار در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد استفاده شد. بخار به یک مخزن جوی که به یک کندانسور متصل بود، تخلیه شد.

1. *Fusarium solani*

تجزیه و تحلیل چهار روش مختلف تولید انجام شد: هیدرولیز اسیدی مواد آمیلاز (میوه موز و تفاله موز) و هیدرولیز مبتنی بر آنزیم مواد لیگنوسلولزی (ساقه گل پوست موز). در این تحلیل، کشت گیاه موز، حمل و نقل مواد اولیه، هیدرولیز، تخمیر، تقطیر، خشک کردن، پردازش باقیمانده و کارخانه مورد بررسی قرار گرفتند (Arredondo et al. 2010). پسماند نارنگی پاکستانی کینو (نارنگی پاکستانی) که خشک، آسیاب شده و به روش هیدروترومال پیش پردازش شده بود برای تولید اتانول از طریق فرآیند ساکاره سازی و تخمیر همزمان توسط اوبروی و همکاران استفاده شد (2011b). پسماند میوه نخل روغن با استفاده از غوطه ور کردن در محلول آمونیاک برای تولید بیواتانول پیش پردازش شدند (Young Hoon et al. 2011). پیش پردازش پسماند میوه نخل روغن در دمای بهینه ۶۰ درجه سانتی گراد، ۱۲ ساعت و ۲۱ درصد (وزنی/وزنی) در محلول آمونیاک انجام شد.

تاناکا و همکاران (1999) هیدرولیز آنزیمی پسماند آناناس را برای تولید اتانول انجام دادند. این عمل در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ روز صورت گرفت. استفاده از آنزیم با غلظت پروتئینی ۰/۳ میلی گرم در میلی لیتر انجام شد. فعالیت ویژه^۱ در روش آزمایش کاغذ فیلتر ۱/۸۲ واحد در میلی گرم بود. پایان دادن به واکنش با افزایش دمای محلول پسماند در آب جوش به مدت حدود ۱۰ دقیقه انجام می شود. یک فرآیند پیش پردازش شیمیایی با استفاده از پراکسید قلیایی و یا هیدرولیز اسیدی بر روی باقیمانده پوست زیست توده میوه انجام شد. این کار برای حذف لیگنین انجام شد. لیگنین یک مانع فیزیکی برای آنزیم‌های سلولولیتیک است (Lalitha 2011). به پسماندهای میوه انبه و موز، با استفاده از روش‌های پردازش با آب گرم مایع و پیش تیمار با استفاده از اسید محلول ضعیف H_2SO_4 ، برای تولید اتانول، اقدام شد (Arumugam and Manikandan 2011). میوه‌های غنی از نشاسته خربزه درختی که فاسد شده بودند، به قطعات خرد شده و تحت روش‌های مختلف فرآوری مانند جوشاندن، له کردن و اتوکلاو قرار گرفتند (Balasubramanian et al. 2011).

پوست‌های سیب، خربزه درختی، شلغم و موز به طور معمول به اندازه ۲-۱ سانتیمتر برش داده شدند. آنها با استفاده از آب شیرین تا زمانی که از گرد و غبار پاک و تمیز شدند، شسته شدند. در نور آفتاب، این پوست‌ها به مدت چند روز به صورت طبیعی خشک شدند. پس از آن، این پوست‌های خشک در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد برای ۴۸ ساعت درون فر کاملاً خشک شدند.

۱. عدد فعالیت ویژه نشان می دهد که هر میلی گرم پروتئین مشخص چه تعداد واحد فعالیت آنزیمی دارد.

سپس، این پوست‌های خشک با استفاده از آب تقطیر شده به نسبت ۱:۶ رقیق شدند. سپس، قبل از استخراج، آنها به مدت ۳۰ دقیقه جوشانده شدند (Kandari and Gupta 2012).

۹-۹ تولید اتانول با استفاده از پسماند مختلف میوه

تولید اتانول با استفاده از پسماند میوه‌های مختلف در زیر بحث شده و در جدول ۹-۳ نشان داده شده است.

۹-۹-۱ پرتقال و نارنگی پاکستانی

تولید اتانول با ساکاره کردن و تخمیر همزمان پسماند نارنگی پاکستانی خشک، آسیاب شده و هیدروترمال پیش تیمار شده توسط اوبروی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت (2011b). در آزمایش تأییدی با استفاده از ۶ (واحد فعالیت آنزیمی بر گرم ماده خشک) FPU/gds سلولز و ۶۰ (واحد بین المللی بر گرم ماده خشک) IU/gds پکتیندر دمای ۳۷ درجه سانتیگراد به مدت ۱۲ ساعت در یک ظرف تخمیر در مقیاس آزمایشگاهی، غلظت اتانول ۴۲ گرم بر لیتر و بازده ۳/۵۰ گرم بر لیتر در ساعت به دست آمد.

سندو و همکاران در سال ۲۰۱۲، قابلیت استفاده از عصاره تصفیه شده خام را که با استفاده از سویه جدا شده جدید قارچ / اسپرگیلوس / اوریز^۱ به دست آمد، مورد مطالعه قرار دادند. تخمیر با استفاده از سویه جدید مقاوم به حرارت مخمر پیچیا کودریاوزویوی^۲ برای تولید اتانول با استفاده از پسماند پوست نارنگی پاکستانی از طریق ساکاره کردن و تخمیر همزمان انجام شد. تحلیل کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا نشان داد که پیش‌هیدرولیز پسماند پوست نارنگی پاکستانی با استفاده از عصاره فیلتر سلولاز در ۳ واحد کاغذ صافی سلولاز بر گرم پیش نیاز خشک (FPU/gds) در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد، $24/87 \pm 0/75$ گرم بر لیتر گلوکز، $21/98 \pm 0/53$ گرم بر لیتر فروکتوز، $10/86 \pm 0/34$ گرم بر لیتر ساکارز و $6/56 \pm 0/29$ گرم بر لیتر اسید گالاتیک تولید کرد. علاوه بر این، مقادیر کمی آرایینوز، گالاتوز و زایلوز نیز تولید شد. فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر پسماند پوست نارنگی پاکستانی پیش پردازش شده با هیدروترمال به صورت همزمان در غلظت پیش نیاز ۱۵ درصد (وزنی به حجم) در یک تخمیر آزمایشگاهی با ظرفیت ۲/۵ لیتر و با استفاده از مخمر پیچیا کودریاوزویوی در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و پس از ۳ ساعت پیش‌هیدرولیز انجام شد.

1. *Aspergillus oryzae*

2. *Pichia kudriavzevii*

جدول ۹-۳. تولید اتانول از پسماند میوه‌های مختلف

منابع	تولید اتانول	آماده‌سازی/هیدرولیز	میکروارگانیزم‌های انجام دهنده تخمیر	ضایعات میوه
Oberoi et al. (2011b)	۳/۵۰ گرم بر لیتر بر ساعت	تجزیه حرارتی	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات نارنگی
Sandhu et al. (2012)	۲/۸۲ گرم بر لیتر بر ساعت	هیدرولیز	مخمر پیچیا کودریاوزویی	ضایعات پوست نارنگی پاکستانی
Sharma et al. (2007)	۲۶/۸۴ گرم بر لیتر	بخار	ساکارومایسس سرویزیه G و پکیسولن تانوفیلوس MTCC 1077	ضایعات پوست نارنگی پاکستانی و پوست موز
Seong Choi et al. (2012)	۹۰/۶ درصد	انفجار آنزیمی	مخمر	پوست نارنگی پاکستانی
Arumugam and Manikandan (2011)	۳۵/۸۶ درصد	تصفیه با آب داغ مایع به همراه آماده سازی اسید رقیق	ساکارومایسس سرویزیه	موز و انبه (گوشته و پوست)
Arumugam and Manikandan (2011)	۱۳/۸۴ درصد	تصفیه با آب داغ مایع به همراه آماده سازی اسید رقیق	ساکارومایسس سرویزیه	پوست میوه موز
Hossain et al. (2011)	۴/۱-۷/۱ درصد	سلولاز پکتیناز	مخمر ساکارومایسس سرویزیه، نوع ۲	ضایعات موز
Sophie et al. (2011)	۱۱۸-۲۶۶ لیتر اتانول	-	-	درخت موز قطع شده
Arredondo et al. (2010)	۷/۴-۷۹/۴ کیلوگرم بر تن زیست توده مرطوب	هیدرولیز اسیدی ماده‌ی آمیلاسیوس، هیدرولیز آنزیمی ماده‌ی لیگنوسلولزی	مخمر یا باکتری	میوه موز و زیست توده باقیمانده آن
Tewari et al. (2003)	۴۴/۵-۶۶/۱ درصد	اسید	ساکارومایسس سرویزیه گونه الیپسوتیدس	پوست موز
Shyam Kumar et al. (2011)	۱/۳ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	موز قرمز رسیده
Shyam Kumar et al. (2011)	۰/۲۷ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	پوست هیدرولیز شده موز قرمز
Shyam Kumar et al. (2011)	۰/۰۲ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	پوست موز هیدرولیز نشده سبز
Manikandan et al. (2008)	۹ گرم در لیتر (سویه جهش یافته چهارم)	اسید سولفوریک و بخار	پنج سویه جهش یافته مختلف ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات پوست موز

منابع	تولید اتانول	آماده سازی/هیدرولیز	میکروارگانیسیم های انجام دهنده تخمیر	ضایعات میوه
Oberoi et al. (2011a)	۲/۳ گرم بر لیتر بر ساعت	تجزیه حرارتی		زیست توده پوست موز خشک و آسیاب شده
Dhabekar and Chandak (2010)	۱/۹۰ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	پوست موز
Reddy et al. (2011)	۵/۱۳ درصد	آنزیم پکتیناز، با نام تجاری (TriZyme 50)	ساکارومایسس سرویزیه مخمر CFTRI 101	عصاره پوست انبه (تخمیر مستقیم)
Reddy et al. (2011)	۷/۱۴ درصد	آنزیم پکتیناز، با نام تجاری (TriZyme 50)	ساکارومایسس سرویزیه مخمر CFTRI 101	عصاره پوست انبه (با مکمل های غذایی)
Mohammad et al. (2010)	۳۹/۶۴ لیتر بر تن	اسید رقیق	مخمر نانویی	ضایعات مرکبات
	۲۶/۹۷-۳۹/۶۰ گرم بر لیتر	بخار تحت فشار	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات پوست مرکبات
Zhou et al. (2008)	۴ درصد	بخار با فشار بالا	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات فراوری مرکبات
Boluda-Aguilar et al. (2010)	۵۰-۶۰ لیتر بر ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده خام ضایعات پوست مرکبات	بخار تحت فشار	ساکارومایسس سرویزیه مخمر CECT 1329	ضایعات پوست مرکبات نارنگی پاکستانی
Boluda-Aguilar and López-Gómez (2013)	۶۰ لیتر بر کیلوگرم زیست توده پوست تازه لیمو	بخار تحت فشار	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات پوست لیمو
Widmer et al. (2010)	۷۶ تا ۹۴ درصد	براساس بخار اسیدی	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات فراوری مرکبات
Dhabekar and Chandak (2010)	۲/۱۵ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات چغندر
Miller et al. (1982)	۵/۱ درصد (بدون تبدیل به قند) ۶ درصد (با تبدیل به قند)	آنزیم	ساکارومایسس سرویزیه نوع Montrachet و سویه 522	تفاله سیب
Ngadi and Correia (1992)	۱۸/۱-۱۹/۳ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	تفاله سیب
Khosravy and Shojaosadati (2003)	۲۰-۳۰ گرم بر کیلوگرم	سلولاز و پکتیناز	ساکارومایسس سرویزیه	تفاله سیب

۹. تولید بیواتانول از پسماند میوه: پیشرفت‌های اخیر ۳۲۱

منابع	تولید اتانول	آماده‌سازی/هیدرولیز	میکروارگانیزم‌های انجام دهنده تخمیر	ضایعات میوه
Jain and Singh (2006)	۳/۹۵۶ درصد	-	تخمیر طبیعی	تفاله سیب (تخمیر طبیعی)
Jain and Singh (2006)	۴/۰۷۴ درصد (Y5)	-	سویه‌های مخمر (Y12 و Y5, Y2)	تفاله سیب (تخمیر از طریق افزودن سلول‌های میکروبی به محیط کشت)
Kumar and Sahgal (2008)	۵/۰۲ درصد	-	سویه مخمر Y5	تفاله سیب (۷۵ درصد) + شیر قند (۲۵ درصد)
Chantanta et al. (2008)	۱۶/۰۹ درصد	-	مخمر ساکارومایسس سروریزه MTCC 173، آسپرژیلوس فتیدوس MTCC، فیوزاریوم اکسی اسپوروم MTCC 1755	تفاله سیب
Hossain and Fazliny (2010)	۸/۷ درصد	-	ساکارومایسس سروریزه	ضایعات آناناس پوسیده
Nigam (1999)	۳/۷۵ گرم بر لیتر بر ساعت	تصفیه با حرارت	ساکارومایسس سروریزه مخمر ATCC 24553	ضایعات کنسرو سازی آناناس
Tanaka et al. (1999)	۵۹/۰ گرم بر لیتر	آنزیم سلولاز	زایموموناس موبیلیس	آبمیوه آناناس‌های فاسد/دور انداخته شده و مواد باقیمانده تولید آبمیوه آناناس (بدون افزودن مواد مغذی)
Tanaka et al. (1999)	۴۲/۵ گرم بر لیتر	آنزیم سلولاز	زایموموناس موبیلیس	آبمیوه آناناس‌های فاسد/دور انداخته شده و مواد باقیمانده تولید آبمیوه آناناس (بدون افزودن مواد مغذی)
Ban-Koffi and Han (1990)	۸ درصد	سلولاز و همی سلولاز	ساکارومایسس سروریزه و زایموموناس موبیلیس	ضایعات آناناس
Prados et al. (2010)	۵ درصد	سلولاز و همی سلولاز	ساکارومایسس بایانوس ۱۹۲۶، ساکارومایسس سروریزه ۱۱۰۲	ضایعات آناناس صنعتی

منابع	تولید اتانول	آماده سازی/هیدرولیز	میکروارگانیسیم های انجام دهنده تخمیر	ضایعات میوه
			ساکارومایسس سرویزیه ۱۳۱۹	
Korkie et al. (2002)	۱۶/۱ و ۱۸/۵ گرم بر لیتر	آنزیم اسیدی	مخمر پیشیا رود/انتسیس یک نمونه خالص کشت داده شده	تغال انگور
		تابش پرتو به مخمر	ساکارومایسس سرویزیه Y294	-
Young Hoon et al. (2011)	۱۸/۶ گرم بر لیتر	محلول آمونیاک	-	شاخه های خالی میوه نخل روغنی
Kandari and Gupta (2012)	۵/۹۰-۴/۹۴ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	پوست میوه های مختلف (خریزه درختی، موز و سیب)
Lalitha (2011)	۱۱۵ میلی گرم بر لیتر	قلیا	فیوزاریوم سولانی	باقیمانده پوست زیست توده میوه
Lalitha (2011)	۱۲ گرم بر لیتر	اسید	فیوزاریوم سولانی	باقیمانده پوست زیست توده میوه
Senthilguru et al. (2011)	۲/۴ درصد	قارچ (گونه های فوما) ^۱	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات میوه
Mishra et al. (2012)	۲/۱۶ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه و کاندیدا/البیکنز	میوه آناناس
Osanaie Akin et al. (2005)	۳/۸۳ تا ۵/۱۹ درصد	-	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات کشاورزی (پاپایا) خربزه درختی
Balasubramanian et al. (2011)	۷/۴ میلی گرم بر میلی لیتر	اتوکلاو جوش	ساکارومایسس سرویزیه	خربزه درختی فاسد شده
Mohamed and Abdel-Wahab (2012)	۲۱/۵۶ گرم بر لیتر (استون، بوتانول، و اتانول)	-	کلسترید یوم استوبوتیلیکو ATCC 824 و باسیلوس سوتیلیس DSM 4451	میوه های فاسد خرما. نام علمی این خرما (Phoenix) (dactylifera)
Hadeel et al. (2011)	۵/۹-۹/۸ درصد	آنزیم	ساکارومایسس سرویزیه	میوه رامبوتان فاسد شده
Oberoi et al. (2010)	۳/۳۷ گرم بر لیتر بر ساعت	اسید	-	پوست پرتغال
Ylittervo (2008)	۰/۳۳ گرم بر گرم	هیدرولیز آنزیمی	موکور/پندیکوس	پوست پرتغال

منابع	تولید اتانول	آماده‌سازی/هیدرولیز	میکروارگانیسیم‌های انجام دهنده تخمیر	ضایعات میوه
	۴/۸-۲/۸ درصد	سلولاز، پکتیناز و بتا گلوکوزیداز	شرشیاکلی نوترکیب <i>KO11</i>	پوست پرتغال
Grohmann et al. (1994)	۴-۵ درصد	پکتیناز، سلولاز و نووزیم	ساکارومایسس سرویزیه	پوست پرتغال
Neelakandan and Usharani (2009)	۶۲/۷ درصد	ژلاتین، سدیم یا پتاسیم متابی سولفیت	ساکارومایسس سرویزیه	عصاره سیب بادام هندی
Mutreja et al. (2011)	۲۱/۱ گرم بر لیتر	اسید	ساکارومایسس سرویزیه	میوه آلوچاوه ای (جمبو)
Mutreja et al. (2011)	۵۸/۰۶ گرم بر لیتر	قلیا	ساکارومایسس سرویزیه	انبه با نام علمی (مانژیفرا اندیکا)
Debapriya et al. (2019)	۹۶/۲ گرم بر لیتر	-	گونه ی سیتروباکتر، سوبه E4	ضایعات میوه
Mohammad et al. (2018)	-	-	ساکارومایسس سرویزیه	ضایعات میوه
Kamlesh et al. (2019)	۶۷/۰-۱/۳۲ درصد	اسید رقیق	ساکارومایسس سرویزیه RK1	گوشته میوه

در فرآیند ساکارازی کردن و تخمیر همزمان، هیچ اولیگوساکاریدی^۱ به‌دست نیامد. تولید اتانول پس از گذشت ۱۲ ساعت تقریباً ثابت شد. این منجر به غلظت اتانول ۳۳/۸۷ گرم بر لیتر و بازده ۲/۸۲ گرم بر لیتر در ساعت شد. این نشان می‌دهد که استفاده از آنزیم‌های خام و مخمر پیچپا کودریا و زوبوی در فرآیند ساکارازی کردن و تخمیر همزمان، با استفاده از پسماند پوست نارنگی پاکستانی، قابلیت تولید اتانول را در مقیاس بزرگ نشان می‌دهد.

۹-۹-۲ نارنگی پاکستانی و پوست موز

شارما و همکاران (2007) تحلیل نقش برخی پارامترهای تخمیر مانند اندازه سلول‌های افزوده شده میکروبی به محیط، مدت زمان سلول‌های افزوده شده میکروبی به محیط، دما و زمان هم زدن برای تولید اتانول با استفاده از پسماند نارنگی پاکستانی و پوست موز را انجام دادند. فرآیند ساکاره سازی و تخمیر همزمان با استفاده از سلولاز و کشت مشترک ساکارومایسس سرویزیه نوع G و مخمر پکیسولن تانوفیلوس MTCC 1077^۲ انجام شد. پسماند نارنگی پاکستانی و

۱. الیگوساکارید به زنجیره‌های ساکاریدی می‌گویند که تعداد مولکول قند کمی داشته باشند.

2. *Pachysolen tannophilus* MTCC 1077

پوست موز (آماده سازی شده با بخار) به عنوان پیش نیاز برای تولید اتانول با نسبت ۴:۶ (پسماند نارنگی پاکستانی / پوست موز) استفاده شد. دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، غلظت سلول‌های افزوده شده میکروبی به محیط مخمر ساکارومایسس سرویزیه ۶ درصد (حجمی به حجمی) و مخمر پکیسولن تانوفیلوس MTCC 1077 ۴ درصد (حجمی به حجمی)، زمان تخمیر ۲ روز و همزدن در طی ۱ روز اول به عنوان بهترین شرایط برای تولید اتانول با استفاده از دو پسماند به همراه یکدیگر گزارش شد. پس از فرآیند ساکارزی کردن آنزیمی، زیست توده (پیش تصفیه شده و تحت فشار بخار) که شامل ۶۳ گرم بر لیتر قندهای کاهنده بود، برای تخمیر با استفاده از سویه‌های تخمیر کننده هگوز و پنتوز مخمر تحت شرایط بهینه استفاده شد. این منجر به تولید اتانول، عملکرد و راندمان تخمیر به ترتیب برابر با ۲۶/۸۴ گرم بر لیتر، ۰/۴۲۶ گرم بر گرم و ۸۳/۵۲ درصد شد. در این تحقیق، استفاده کارآمد از پسماند نارنگی پاکستانی و پوست موز برای به دست آوردن بیواتانول با استفاده از پارامترهای تخمیر بهینه گزارش شد.

۹-۹-۳ پسماند انبه / موز

تجزیه و تحلیل ترکیب (شیمیایی) پسماند میوه (هم تفاله و هم پوست) موز و انبه از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی برای بررسی کاربردهای احتمالی آنها برای تولید بیواتانول انجام شد (Arumugam and Manikandan, 2011). تخمیر هیدرولیز حاصل از آماده سازی اسیدی ناچیز از مخلوط گوشت میوه، بیشترین تولید اتانول را با مقدار ۳۵/۸۶ درصد نشان داد. این معادل با کارایی تخمیر حدود ۷۰/۳۱ درصد در زمان ۴۸ ساعت سلول‌های افزوده شده میکروبی به محیط، مطابقت دارد. این آزمایش نشان داد که هیدرولیزهایی که از پیش پردازش پوست موز با استفاده از اسید سولفوریک (ناچیز) به دست می‌آید، با بازده بالا ترکیبی از ۱۳/۸۴ درصد اتانول و کارایی تخمیر ۲۷/۱۳ درصد در زمان ۴۲ ساعت تخمیر را به دست می‌دهد. این تحقیق نشان می‌دهد که تخمیر هیدرولیزهایی که از پیش پردازش اسیدی ناچیز صورت می‌گیرد؛ سپس به شیرین سازی آنزیمی گوشت میوه‌های مختلط (موز و انبه) و پوست موز قرار می‌گیرند، برای تولید اتانول با بازده بالا در شرایط بهینه مناسب است.

۹-۹-۴ پسماند موز

تخمیر پسماند موز با استفاده از مخمر ساکارومایسس سرویزیه نوع II در شرایط بی هوازی انجام شد (Hossain et al., 2011). این امر، برای تعیین تولید بیواتانول انجام شد. تقریباً ۴/۱ درصد تا ۷/۱ درصد بیواتانول با استفاده از پسماند میوه تخمیر شده موز به دست آمد. بیواتانول

به‌دست‌آمده دارای خاصیت لزج و مقدار اسید مطابق با استانداردهای آزمون مواد آمریکا و استانداردهای اروپایی است. این تحقیق گزارش داد که استفاده از ترکیب (پوست و تفاله) میوه‌های فاسد برای تولید بیواتانول به عنوان انرژی تجدیدپذیر کاملاً مناسب است. این تحقیق منجر به بررسی جنبه‌های اقتصادی مرتبط با فرآیند اولیه شد. تحقیقی انجام شده توسط سوفی و همکارانش (2011) قابلیت تولید کمی اتانول با استفاده از پسماند موز را ارزیابی کرد. آنها گزارش دادند که با جمع‌آوری پسماند موز و موز رسیده به میزان تقریبی ۱/۴ تا ۳/۴ تن در هکتار، تولید سالانه ۱۱۸ تا ۲۶۶ لیتر اتانول امکان‌پذیر است. تحقیقی توسط آرنوندو و همکارانش (2010) انجام شد که در آن تجزیه و تحلیل انرژی برای به‌دست آوردن اتانول بی‌آب انجام شد. این تولید با استفاده از هیدرولیز نشاسته و مواد سلولزی و همی‌سلولزی موجود در میوه موز و زیست توده باقی‌مانده آن به دست آمد. تجزیه و تحلیل چهار مسیر تولید انجام شد: هیدرولیز اسیدی ماده آمیلاز (میوه موز و تفاله موز) و هیدرولیز آنزیمی ماده لیگنوسلولزی (پوست موز و ساقه گل). ماده آمیلاز بهترین شاخص‌ها را ارائه داد. در این مورد، عملکرد جرمی بین ۳۴۶/۵ تا ۳۸۸/۷ لیتر بر تن بود. ارزش انرژی خالص بین ۹/۸۶ تا ۹/۹۴ مگاژول بر لیتر متغیر بود و نسبت انرژی برابر ۱/۹ مگاژول بر مگاژول به‌دست آمد. در صورت استفاده از ماده لیگنوسلولزی، مقادیر مطلوب کمتری به دست می‌آمدند. عملکرد جرمی بین ۸۶/۱ تا ۱۲۳/۵ لیتر بر تن بود، ارزش انرژی خالص بین ۵/۲۴ تا ۸/۷۹ مگاژول بر لیتر و نسبت انرژی در محدوده ۱/۳ تا ۱/۶ مگاژول بر مگاژول قرار داشت.

به منظور تولید اتانول، از پوسته‌های زیست توده خشک و آسیاب شده، موز رسیده و پسماند موزها، و پوسته‌های هیدرولیز شده موزهای سبز و قرمز استفاده شد. این عمل با استفاده از کشت مخمر ساکارومایسس سرویزیه در فلاسک‌های تکان‌دهنده انجام شد. غلظت‌های مختلف بستر (با درصدهای ۱ درصد، ۲/۵ درصد، ۵ درصد، ۷/۵ درصد و ۱۰ درصد به وزن/حجم) با افزودن سلول‌های میکروبی به محیط (با غلظت ۱ درصد) ترکیب شد. بازده حداکثر اتانول در مخمر ساکارومایسس سرویزیه در موز رسیده (قرمز) و پوست آن (هیدرولیز شده) حدوداً ۱/۳ درصد و ۰/۲۷ درصد (حجم به حجم) در غلظت ۱۰ درصد پیش‌ماده گزارش شده است. در پوست موز سبز بدون هیدرولیز (با غلظت ۱ درصد پیش‌ماده)، کمترین بازده حدود ۰/۰۲ درصد الکل به دست آمد.

مطالعات سینتیک برای به دست آوردن اتانول با استفاده از پسماند پوست موز با استفاده از پنج سویه جهش یافته مختلف مخمر ساکارومایسس سرویزیه توسط مانیکاندان و همکاران انجام شد (2008). سویه جهش یافته چهارم حداکثر تولید اتانول را در ۹ گرم در لیتر داشت. تیواری

و همکاران در سال ۲۰۰۳، تبدیل به قند در پوست موز با استفاده از اسیدها، آنزیم‌ها و بخار مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی به منظور بررسی قابلیت پسماند موز در زمینه تخمیر اتانول با استفاده از مخمر *Saccharomyces cerevisiae* واریته ellipsoideus انجام شد. با استفاده از اسید سولفوریک (۲/۵ درصد) به مدت حدود ۱۵ دقیقه و در فشار ۱۵ psi، هیدرولیز مواد اولیه باعث افزایش بیش از ده برابر در مقادیر قندهای کاهنده شد. حداکثر تبدیل به قند به میزان ۲۶/۷ درصد و ۲۸/۳ درصد (بر اساس وزن) و ۵۶/۴ درصد و ۵۹/۹ درصد (بر اساس CH_2O) با استفاده از اسید ۲/۵ درصد در فشارهای ۱۰ و ۱۵ psi و به مدت ۱۵ دقیقه حاصل شد. افزایش ترکیب اسید سولفوریک و زمان تصفیه، تأثیر معکوسی روی هیدرولیز داشت. بخار گرمایی بدون فشار، تبدیل به قند به میزان شش برابر افزایش یافت. بخار تحت فشار ۱۰ psi به مدت حدود ۳۰ دقیقه باعث تبدیل به قند مفید شد. با هیدرولیز سلولز پسماندهای موز با استفاده از آنزیم سلولاز از قارچ *Trichoderma reesei* QM 9414^۱، حداکثر تبدیل به قند حاصل شد. به ترتیب یک راندمان ۱/۳۸ درصد و ۰/۷۸ درصد (حجم به حجم) و الککل ۴۴/۵ درصد و ۶۱/۱ درصد (میلی گرم برای هر گرم قندهای کاهنده) از سلولز و پوست موز هیدرولیز شده با اسید (۲/۵ درصد در فشار ۱۵ psi به مدت ۱۵ دقیقه) به دست آمد.

باقیمانده پوست موز خشک و آسیاب شده از طریق استریلیزاسیون هیدروترمال پیش آماده سازی شد. سپس، از آن برای تولید اتانول از طریق فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان استفاده شد (Oberoi et al. 2011a). غلظت سلولاز و پکتیناز، دما و زمان تولید اتانول با استفاده از پوست موز از طریق تبدیل به قند و تخمیر همزمان با استفاده از طراحی مرکب مرکزی^۲ انجام شد. تحلیل و تحلیل واریانس^۳ نشان داد که مقدار ضریب تعیین بالای ۰/۹۲ برای تولید اتانول وجود دارد. اعتبار سنجی در یک تخمیر نیمه پیوسته در مقیاس آزمایشگاهی بر اساس نمودارهای مدل و بهینه سازی عددی انجام شد. غلظت سلولازها، پکتیناز، دما و زمان حاصل به ترتیب ۹ واحد کاغذ صافی سلولاز بر گرم سلولز (FPU/g cellulose)، ۷۲ واحد بین المللی بر گرم پکتین (IU/g-pectin) در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد و مدت زمان ۱۵ ساعت بود. آزمایش انجام شده در تخمیر نیمه پیوسته با استفاده از پارامترهای بهینه سازی شده، منجر به افزایش غلظت اتانول شد. این مقدار بیشتر از پیش بینی های انجام شده توسط معادله مدل بود. در اینجا زمان تخمیر نیز صرفه جویی شد. گزارش شده است که هر دو پیش آماده سازی هیدروترمال و تبدیل به قند و تخمیر همزمان می توانند با موفقیت در یک واحد تکمیلی انجام

1. *Trichoderma reesei* QM 9414

2. Central Composite Designs

3. ANOVA

شوند. استفاده از پارامترهای بهینه فرآیند، منجر به دستیابی به تولید قابل توجهی از اتانول شد. این نشانگر قابلیت تجاری فرآیند است. غلظت اتانول ۲۸/۲ گرم بر لیتر و بازده اتانول ۲/۳ گرم بر لیتر در ساعت از پوست موز گزارش شده است. دبکار و چانداک (2010) گزارش کردند که تولید اتانول از پوست موز تقریباً معادل ۱/۹۰ درصد دکستروز^۱ است.

۹-۵ پسماند انبه

دو نوع پسماند وجود دارد، یعنی پسماند جامد (هسته و پوست) و پسماند مایع (آب شستشو و آب میوه) که توسط صنایع تبدیلی که با میوه انبه سروکار دارند تولید می‌شوند. ردی و همکارانش (2011) مطالعه‌ای را برای یافتن مناسب بودن پوست خشک انبه برای تولید اتانول انجام دادند. اتانول (۵/۱۳ درصد، وزنی به حجمی) با تخمیر مستقیم عصاره پوست انبه تولید شد. مواد مغذی مانند عصاره مخمر، عصاره سبوس گندم و پپتون (نوعی پروتئین) به عنوان مکمل‌ها در محیط پوست انبه استفاده شدند. آنها گزارش کردند که اضافه کردن این مواد مغذی باعث افزایش قابل توجهی در تولید اتانول به حدود ۷/۱۴ درصد (وزنی به حجمی) می‌شود.

۹-۶ پسماند مرکبات

تولید بیواتانول با استفاده از پیش‌آماده‌سازی بخار تحت فشار و هیدرولیز آنزیمی بر پوست میوه لیمو انجام شد (Boluda-Aguilar and López-Gómez 2013). پردازش بخار تحت فشار روی پسماند پوست لیمو از طریق هیدرولیز و تخمیر همزمان انجام شد. آنها گزارش دادند که تولید اتانول بیش از ۶۰ لیتر در ۱۰۰۰ کیلوگرم زیست توده پوست لیموی تازه می‌تواند تولید شود. محمد و همکاران (2010) از یک فرآیند یکپارچه برای تولید اتانول با استفاده از پسماندهای مربوط به مرکبات استفاده کردند. یک فرآیند اسید رقیق برای هیدرولیز پسماندهای مرکبات انجام شد. این فرآیند در یک مقیاس بزرگتر و با استفاده از تجهیزات شرایط شبیه‌سازی نیروگاه، انجام شد. در هیدرولیزها، قندهایی وجود داشتند که به وسیله مخمر نانوائی به اتانول تبدیل شدند. بازده اتانول تقریباً ۰/۴۳ گرم بر گرم از قندهای قابل تخمیر گزارش شد. تقریباً ۳۹/۶۴ لیتر اتانول از ۱ تن پسماند مرکبات با ۲۰ درصد وزن خشک تولید شد. ژو و همکاران (2008) مطالعه‌ای انجام دادند و گزارش کردند که پسماند به دست آمده پس از پردازش مرکبات را می‌توان تخمیر کرد و تقریباً ۴ درصد وزنی-وزنی اتانول تولید کرد.

۱. یک مونوساکارید است که به عنوان قند ساده نیز شناخته می‌شود.

برای تولید بیواتانول، مطالعه‌ای بر روی پسماند پوست مرکبات نارنگی توسط بولودا-آگویلار و همکاران در سال ۲۰۱۰ انجام شد. محصولات همزمان به دست آمده شامل دی-لیمونن، اسید گالاکتورونیک و تفاله مرکبات بود. مقادیر دی-لیمونن و تأثیر آنها بر تولید اتانول نیز مورد بررسی قرار گرفت. غلظت قندهای مختلف، اسید گالاکتورونیک و اتانول برای اندازه‌گیری کارایی فرایندهای تبدیل به قند و تخمیر (تبدیل به قند و تخمیر/تبدیل به قند و تخمیر همزمان) فرایندهایی که توسط آماده سازی پسماند پوست مرکبات نارنگی شامل بخار تحت فشار گزارش شده بود، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقدار اتانول تقریباً ۶۰-۵۰ لیتر بر هر ۱۰۰۰ کیلوگرم از پسماند پوست مرکبات نارنگی خام به دست آمد. با کنترل دقیق دوز آنزیم‌ها و تیمار با استفاده از بخار تحت فشار، بازدهی تفاله مرکبات می‌تواند بهینه شود. این امر می‌تواند نیاز به آنزیم را به طرز قابل توجهی کاهش دهد. ویدمر و همکاران (2010)، آماده سازی پسماند فرآوری مرکبات را در زمان، pH و دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. لیمونن یک مهارکننده تخمیر است. برای حذف لیمونن به کمتر از ۰/۱ درصد، نیاز به آماده سازی دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت بیش از ۴ دقیقه و همراه با تصفیه با بخار است. پس از آماده سازی در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد، همی سلولزها به خوبی حل شدند. حل شدن فقط ۷۰ درصد پکتین در پسماند فرآوری مرکبات طبیعی انجام شد. اما با استفاده از پسماند فرآوری مرکبات تغییر یافته اسیدی ($pH=2/8$)، بیش از ۸۰ درصد پکتین حل شد. پکتین به سرعت با آماده سازی در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد روی پسماند فرآوری مرکبات اصلاح شده (با pH اولیه ۶/۸) از بین رفت. جامدات محلول به طور قابل توجهی کاهش یافتند و همچنین بیش از حد لزج بودند. پس از آماده سازی در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت نزدیک به ۸ دقیقه در پسماند فرآوری مرکبات در محدوده pH ۲/۲ تا ۸/۲، مقدار کل قندهای قابل تخمیر بدون تغییر باقی ماند. بازده اتانول بر اساس مقادیر قند پس از هیدرولیز آنزیمی پس از ۴۸ ساعت از تبدیل به قند و تخمیر به طور همزمان از ۷۶ درصد تا ۹۴ درصد متغیر بود. بازده اتانول اندکی کمتر بود اما تفاوت از نظر آماری بین عملکرد اتانول در روش آماده‌سازی اصلاح شده با روش پایه وجود نداشت.

اثرات غلظت دی-لیمونن، بارهای آنزیمی و pH بر تولید اتانول از طریق تبدیل به قند و تخمیر همزمان پسماند پوست مرکبات با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد توسط ویلکینس و همکاران بررسی شد. قبل از تبدیل به قند و تخمیر همزمان، پوست مرکبات از روش بخار تحت فشار بررسی شد. این کار به منظور حذف بیش از ۹۰ درصد دی-لیمونن اولیه که در پوست‌های پسماند وجود داشت، انجام شد. رشد مخمر

توسط دی-لیمونن مهار می‌شود. آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شدند که دی-لیمونن را به پوست‌های پسماند اضافه کردند و میزان مهار حد آستانه را تعیین کردند. غلظت اتانول پس از گذشت ۲۴ ساعت در تخمیر که غلظت اولیه دی-لیمونن برابر یا بیشتر از ۰/۳۳ درصد (حجمی به حجمی) بود و غلظت نهایی (روز اول) دی-لیمونن برابر یا بیشتر از ۰/۱۴ درصد (حجمی به حجمی) بود، کاهش یافت. تولید اتانول هنگامی کاهش یافت که بار آنزیمی (به واحد IU یا FPU بر گرم جامد خشک پوست) از نوع پکتین (۲۵ FPU بر گرم جامد خشک پوست)، سلولاز (۰/۰۲ FPU بر گرم جامد خشک پوست) و بتا-گلوکوزیداز (۱۳ FPU بر گرم جامد خشک پوست) بود. تولید اتانول با تنظیم pH اولیه پوست‌های پسماند به حدود ۶/۰ بالاترین مقدار را داشت.

سئونگ چویی و همکاران (2012) یک سیستم آماده‌سازی زیست توده طراحی کردند. آن‌ها از یک مشعل آتش همراه با سیلندر افقی که در امتداد محور آن چرخش می‌کرد، استفاده کردند. این کار برای تولید اتانول با استفاده از پوست نارنگی پاکستانی انجام شد. آماده‌سازی با روش تصفیه پاپینگ^۱ با دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و به مدت تقریبی ۱۰ دقیقه بدون استفاده از روش شیمیایی انجام شد. این روش آماده‌سازی، باعث کاهش اندازه ذرات (کمتر از ۱ میلی‌متر) و کاهش غلظت دی-لیمونن (مهارکننده تخمیر مخمر) از ۰/۲۱ درصد به حدود ۰/۰۱ شد. هیدرولیز آنزیمی پوست نارنگی پاکستانی آماده‌سازی شده در بافر ۵۰ میلی مولار استات سدیم (با ۴/۸ pH) در دمای ۴۵ درجه سلسیوس و به مدت حدود ۶ ساعت انجام شد. میزان کلی تبدیل به قند تقریباً ۹۵/۶ درصد بود. غلظت قندهای قابل تخمیر به وسیله فرآیند تبخیر خلاء^۲ به ۱۰ درصد (گلوکز ۷/۱ درصد و فروکتوز ۲/۹ درصد) افزایش یافت. نتیجه ی تخمیر در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و ۵/۰ pH به مدت حدود ۱۲ ساعت در بیوراکتور آزمایشگاهی، عملکرد اتانول را نسبت به استفاده از پوست تازه نارنگی پاکستانی در ۳۶ ساعت، از ۷۸ درصد به ۹۰/۶ درصد افزایش داد.

۹-۷ پسماند چغندر قند

دابکر و چانداک (۲۰۱۰) در مطالعات خود اثبات کرده‌اند که مخمر ساکارومایسس سرویزیه

۱. در این فرآیند، قطعات میوه در معرض حرارتی و فشار بالا قرار داده می‌شود. و موجب می‌شود که رطوبت موجود در بافت میوه به سرعت تبدیل به بخار شده و موجب باد شدن و پاپ شدن محصول نهایی شود. محصول نهایی دارای بافتی ترد و حجیم است.

۲. فرآیندی است که باعث می‌شود فشار در یک ظرف پر از مایع به زیر فشار بخار مایع کاهش یابد و باعث تبخیر مایع در دمای پایین تر از حد معمول شود.

صفات قابل توجهی برای تولید اتانول دارد. در مورد پسماند چغندر، تولید اتانول تقریباً برابر با ۲/۱۵ درصد (حجمی به حجمی) در روز چهارم، در حالی که در مورد دکستروز تولید اتانول ۲/۰۵ درصد (حجمی به حجمی) بود. همچنین آنها گزارش دادند که تولید اتانول با پوست موز تقریباً ۱/۹۰ درصد (حجمی به حجمی) است که مشابه دکستروز است.

۹-۸-۹ گوشت سیب

تأمین گوشت سیب با قیمت بسیار ارزان صورت می‌گیرد. نیاز به سطح زمین بسیار کم است. در آزمایشگاه، تولید در طول فرآیند تخمیر به شرایط آب و هوایی بیرونی وابسته نیست. به همین دلیل، تولید اتانول با استفاده از گوشت سیب یک گزینه جذاب است. تحقیقات فراوانی درباره تولید اتانول از طریق تبدیل به قند و تخمیر همزمان گوشت سیب به عنوان تنها پیش نیاز (Kaur 1989) یا با استفاده از تبدیل به قند و تخمیر همزمان برای غنی‌سازی مواد مغذی انجام شده است (Hang 1988).

ساکارزی کردن و تخمیر اتانول با استفاده از گوشت سیب توسط میلر و همکاران (1982) انجام شد. بالاترین بازده اتانول با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* سویه Montrachet ۵۲۲ در مقدار ۷/۷۳ درصد یا ۶/۴۸ درصد ساکارزی کردن گزارش شد. آنها با استفاده از ۱۰۰ گرم از پوست سیب، بازده اتانولی ۵/۱ درصد (وزنی به وزنی) را بدست آوردند. نگادی و کریا (1992) در مطالعه خود، تبدیل به قند و تخمیر همزمان پوست سیب را گزارش کردند. مقادیر رطوبت به ترتیب ۷۷ درصد و ۸۵ درصد (براساس وزن تر) بود و سرعت‌های اختلاط به ترتیب ۲، ۲۰ و ۴۰ دور در دقیقه بود. میکروارگانیسم مورد استفاده مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* بود. میانگین غلظت حداکثر اتانول به ترتیب ۱۸/۱ درصد و ۱۹/۳ درصد (براساس وزن تر) در سطوح رطوبت ۸۵ درصد و ۷۷ درصد (براساس وزن خشک) گوشت سیب بدست آمد. میانگین غلظت اتانول به ترتیب ۱۰/۸ درصد، ۱۰/۳ درصد و ۹/۳ درصد (براساس وزن خشک) در سرعت‌های مخلوط‌کننده بیوراکتور ۲، ۲۰ و ۴۰ دور در دقیقه گزارش شد. علاوه بر این، بالاترین غلظت اتانول در سرعت‌های ۲ و ۲۰ دور در دقیقه نسبت به ۴۰ دور در دقیقه بدست آمد.

در شرایط تخمیر گوشت سیب، بازده اتانول به میزان ۳۰-۲۰ گرم بر کیلوگرم گوشت سیب گزارش شده است. مخمر مورد استفاده *ساکارومایسس سرویزیه* بود. مقادیر رطوبت ۷۵ درصد

(وزنی به وزنی)، دمای افزودن سلول‌های میکروبی به محیط ۳۰ درجه سانتیگراد و منبع نیتروژن ۱۵ درصد (وزنی به وزنی) و منبع فسفر به میزان ۰/۰۸ درصد (وزنی به وزنی) بود. غلظت سلول‌های میکروبی افزوده شده به محیط ۵۰۰۰۰۰۰ سلول در کیلوگرم بود. عملکرد اتانول ۲۰-۳۰ گرم بر کیلوگرم گوشت سیب بود. این عملکرد وابسته به شرایط تخمیر و آماده سازی‌های پیش نیاز تبدیل به قند با استفاده از آنزیم‌های سلولاز و پکتیناز بود (2003 Khosravy and Shojaosadati). تخمیر پوست سیب با استفاده از سویه‌های مختلف مخمرهای ساکارومایسس سرویزیه (Y2، Y5، و Y12) انجام شد. این کار به منظور تجزیه و تحلیل فرآیند تخمیر گوشت سیب انجام شد. در تخمیرهای طبیعی، تولید اتانول بعد از ۷۲ ساعت تخمیر ۳/۹۵۶ درصد بود. همانطور که توسط جین و سینگ (2006) اثبات شده است، در تخمیری که با استفاده از سویه Y5 انجام شد، موجب بالاترین بازده اتانول به میزان ۴/۰۷۴ درصد در مدت زمان ۷۲ ساعت افزودن سلول‌های میکروبی به محیط شد. تحقیقات توسط کومار و ساهگال (2008) درباره سویه مخمر Y5 انجام شد. این سویه هنگامی که به ترکیب پیش نیاز ۷۵ درصد گوشت سیب و ۲۵ درصد شیر قند اضافه شد، منجر به بالاترین تولید اتانول (۵/۰۲ درصد) در ۷۲ ساعت تخمیر شد. چانتاتا و همکاران (2008) بررسی کردند که هنگام استفاده همزمان از تمام سویه‌های مخمر ساکارومایسس سرویزیه MTCC 173، آسپرژیلوس فوئیدوس MTCC و فوزاریوم اکسیسپوروم MTCC 1755 برای تخمیر گوشت سیب، تولید اتانول ۱۶/۰۹ درصد (حجمی به وزنی) بود.

۹-۹-۹ آناناس

حسین و فضل (۲۰۱۰) بیواتانول را با استفاده از پسماند آناناس پوسیده از طریق تخمیر با استفاده از مخمر تجاری ساکارومایسس سرویزیه به دست آوردند. آنها گزارش کردند که بازده بهینه بیواتانول ۸/۷ درصد بود. در تجزیه و تحلیل اتانول بی آب، آنها هیچ عنصر خطرناکی در پذیرش آن به عنوان سوخت برای حمل و نقل طبق استاندارد انجمن مواد و آزمون آمریکا^۱ پیدا نکردند. نیگام (1999) تولید پیوسته اتانول با استفاده از پسماند کارخانه کنسرو آناناس را با استفاده از سویه نقص تنفسی^۲ ساکارومایسس سرویزیه ATCC 24553 در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و pH ۴/۵ مورد بررسی قرار داد. بیشترین بازده اتانول (۹۲/۵ درصد، نظری) در میزان رقیق سازی آب ۰/۰۵ ساعت مشاهده شد. بالاترین مقادیر بازده حجمی اتانول و زیست

1. ASTM standard

۲. سویه‌های نقص تنفسی، به دلیل نقص در سیستم تنفسی یا نبود منابع اکسیژن، قادر به انجام تنفس کامل نیستند و به جای آن از مسیرهای جانبی مانند تخمیر برای تولید انرژی استفاده می‌کنند.

توده به ترتیب ۳/۷۵ گرم در لیتر در ساعت و ۰/۶۳ گرم در لیتر در ساعت بود. این مقادیر در نرخ رقت آب ۰/۱۵ در ساعت مشاهده شدند. بیشترین بازده مخصوص اتانول نیز به مقدار ۰/۹۸ گرم در گرم در لیتر در ساعت مشاهده شده است.

تاناکا و همکاران (1999) تولید اتانول با استفاده از آب میوه آناناس‌های فاسد/دور ریخته شده را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین، پسماندی که پس از تولید آب میوه آناناس توسط باکتری *زیموموناس موبیلیس* به دست آمد نیز مورد مطالعه قرار گرفت. در آب میوه آناناس بدون رقیق سازی با آب، تقریباً ۵۹/۰ گرم در لیتر اتانول به دست آمد. در این تحقیق، هیچ مکمل غذایی و بهینه‌سازی pH انجام نشد. با استفاده از محیط ساکاروز ۱۲۵ گرم در لیتر که با استفاده از ۱۰ گرم در لیتر عصاره مخمر و مواد معدنی غنی شده بود، تقریباً ۴۲/۵ گرم در لیتر اتانول گزارش شد.

مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* و باکتری *زیموموناس موبیلیس* مجاز به رشد در پسماند آناناس بودند. ویژگی‌های تولید الکلی آن‌ها مقایسه شد. پسماند آناناس شامل سلولز (۱۹ درصد)، همی سلولز (۲۲ درصد)، لیگنین (۵ درصد) و مواد قابل حل در سلول (۵۳ درصد) بود. غلظت قندهای قابل حل، که شامل ساکارز (۵/۲ درصد)، گلوکز (۳/۱ درصد) و فروکتوز (۳/۴ درصد) بود، نسبتاً کمتر بود و نیاز به آماده سازی پیش نیازها وجود داشت. آماده سازی پسماند آناناس با استفاده از سلولاز و همی سلولاز و سپس تخمیر با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* یا باکتری *زیموموناس موبیلیس*، تقریباً ۸ درصد اتانول با استفاده از پسماند آناناس در ۴۸ ساعت گزارش شد.

پرادوس و همکاران (2010) از پسماند صنعتی آناناس برای تولید اتانول استفاده کردند. برای تولید بیواتانول، سه روش مختلف از پسماند آناناس مورد تحلیل قرار گرفت. این روش‌ها شامل تخمیر مستقیم محلول استخراج شده، تبدیل به قند و تخمیر متوالی پسماند ترکیب شده، و تبدیل به قند و تخمیر همزمان پسماند ترکیب شده بودند. آزمایش سه مخمر مختلف صنعتی شامل *ساکارومایسس بایانوس* 1926، *ساکارومایسس سرویزیه* 11,020، *ساکارومایسس سرویزیه* 1319 انجام شد. سلولاز و همی سلولاز از شرکت سیگما آلدریج، در اسپانیا خریداری شد و برای انجام هیدرولیز مواد سلولزی (۱ گرم در کیلوگرم مواد سلولزی به همراه ۱/۲ واحد همی سلولاز و ۶ گرم در کیلوگرم مواد سلولزی به همراه ۰/۸۷ واحد سلولاز) استفاده شد. در زمینه آزمایش‌های تخمیر، برای مواد غیر هیدرولیز شده، بالاترین خروجی با گندزدایی مواد

پسماند مشاهده شد. pH به مقدار ۵ تنظیم شد و پس از گذراندن ۷۲ ساعت از تخمیر، میانگین بازده ۵ درصد اتانول مشاهده شد.

۹-۹-۱۰ پسماند انگور

جداسازی و ارزیابی سویه‌های مخمر توسط کورکی و همکاران (۲۰۰۲) انجام شد. این سویه‌های مخمر با تفاله انگور مرتبط بودند و توانایی آنها برای انجام هیدرولیز پلی ساکاریدهای پیچیده موجود در تفاله انگور انجام شد. از قندهای قابل تخمیر برای تولید اتانول استفاده شد. پلی ساکاریدهای تفاله تا حدی توسط دو مخمر پیچیا رود/انسس^۱ مجزا هیدرولیز شدند. افزایش جزئی در مقدار اتانول تولید شده در نتیجه تخمیر تفاله مشاهده شد. در این مطالعه مشخص شد که مقدار قابل توجهی اتانول با استفاده از قند باقیمانده مرتبط با تفاله انگور به دست آمد.

۹-۹-۱۱ روغن نخل

تولید اتانول با استفاده از باقیمانده‌های میوه نخل روغنی که با استفاده از افزودن در محلول آمونیاک پیش تصفیه شده بودند، توسط یانگ هون و همکاران (2011) تحلیل شد. با استفاده از باقیمانده‌های پیش تصفیه شده از باقیمانده‌های میوه نخل روغنی، گزارش شده است که تولید اتانول به مقدار نزدیک به ۱۸/۶ گرم در لیتر، ۶۵/۶ درصد از بهره بالاترین نظری و سرعت تولید ۰/۱۱ گرم در لیتر در ساعت انجام شده است. در این فرآیند، با بارگذاری گلوکان (با غلظت ۵ درصد وزنی به حجم)، سلولز (۶۰ واحد فعالیت آنزیمی FPU) و بتا-گلوکوزیداز (۳۰ واحد فعالیت آنزیمی CBU) در هر گرم گلوکان، تبدیل به قند و تخمیر همزمان به مدت ۱۶۸ ساعت صورت گرفت.

۹-۹-۱۲ پوست میوه

تولید اتانول با استفاده از پوست میوه‌های مختلف توسط کاندراری و گوپتا (2012) مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین تولید اتانول در مدت ۳۶ ساعت تخمیر در عصاره پوست خربزه درختی گزارش شد. پس از خربزه درختی، عصاره پوست موز و سیب (با درصد‌های بین ۴/۹۴ تا ۵/۹۰ درصد) نتایج مناسبی را به دنبال داشتند. بهینه سازی شرایط آماده سازی برای راندمان بالای تولید اتانول با استفاده از باقی مانده پوست زیست توده میوه توسط لالیتا (2011) انجام شد.

1. *Pichia rhodanensis*

تخمیر باقیمانده با استفاده از مخمر *Fusarium solani*^۱ انجام شد. با استفاده از روش‌های قلیایی شامل استفاده از H_2O_2 (۲ درصد) در pH ۱۳ و خیساندن در محیطی به مدت ۸ ساعت، تولید اتانول به مقدار ۱۱۵ میلی گرم در لیتر انجام شد. با استفاده از روش‌های اسیدی شامل استفاده از ۰/۲ مول بر لیتر H_2SO_4 و تخمیر به مدت حدود ۱۵ روز، تولید اتانول در ۲۴ ساعت به مقدار ۱۲ گرم در لیتر بود.

غلظت اتانول با استفاده از پسماند میوه‌ها تحت تأثیر قرار گرفته توسط مخمرها اندازه‌گیری شد. برای این منظور، با استفاده از ۳ میلی لیتر از کشت روز دوم در سلول‌های مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* افزوده شده به محیط کشت، تغذیه شد (Senthilguru et al. 2011). بازده اتانول از پسماند میوه‌ها ۲/۴ درصد (حجم به وزن) بود، که معادل ۲/۴ گرم اتانول در هر ۱۰۰ گرم پسماند میوه بود. میشر و همکاران (۲۰۱۲) از مخمرهای (*ساکارومایسس سرویزیه* و *کاندیدا/آلبیکنز*) برای تولید اتانول از میوه‌های پرتقال، لیموشیرین و آناناس استفاده کردند. آنها افزایش قابل توجهی در مقدار اتانول تولیدی از طریق تخمیر غوطه‌ور^۲ گزارش کردند. این مقدار بیشتر از مقدار گزارش شده در تخمیر محیط جامد بود. بیشترین مقادیر اتانول (۲/۱۶ درصد حجمی) از آناناس در شرایط تخمیر محیط جامد به دست آمد.

۹-۹-۱۳ موز درختی

سویه‌های مخمر فعال خشک نانویی و مخمر آبجو (*ساکارومایسس سرویزیه*) برای انجام تخمیر موز درختی که یک پسماند کشاورزی است، استفاده شد (Osaniaye Akin et al. 2005). مقادیر اتانول حدود ۵/۱۹-۳/۸۳ درصد (حجمی به حجمی) توسط موز درختی تخمیر شده به دست آمد. مقدار بیشتری اتانول توسط مخمر آبجو نسبت به مخمر نان به دست آمد. فرآیند تبدیل به قند به مدت ۴۸ ساعت همراه با تکمیل مواد مغذی، به طور قابل توجهی عملکرد اتانول را افزایش داد.

۹-۹-۱۴ خربزه درختی

جمع‌آوری میوه‌های فاسد شده خربزه درختی که غنی از نشاسته بودند، انجام شد. آنها برای تولید اتانول توسط بالاسوبرامانیان و همکاران (2011) تجزیه و تحلیل شدند. روش‌های

1. *Fusarium solani*

۲. تخمیر غوطه‌ور روشی است که در آن آنزیم‌ها و سایر ترکیبات واکنش پذیر در مایعی مانند الکل، روغن یا محیط مغذی غوطه‌ور می‌شوند.

مختلف پردازش در معرض پیش نیاز قرار گرفتند. از روش‌هایی مانند جوشاندن، خمیر کردن و اتوکلاو استفاده شد. پس از انجام این روش‌ها، تبدیل به قند توسط باکتری (لاکتوباسیلوس) انجام شد. فرآیند تخمیر الکلی با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* بر روی پیش نیازهای ساکاره شده باکتری انجام شد. پس از ۴۲ ساعت تخمیر، غلظت اتانول در محلول ۷/۴ میلی گرم در میلی لیتر بود.

۹-۹-۱۵ درخت خرما

برای تولید استون، بوتانول و اتانول، از میوه‌های خرمای فاسد به عنوان پیش نیاز استفاده شد. مشارکت میکروبی باکتری *کلستریدیوم/استو بوتیلیکوم* ATCC 824^۱ و باکتری *باسیلوس سوبتیلیس* DSM 4451^۲ استفاده شد. مجموع تولید استون، بوتانول و اتانول به مقدار ۲۱/۵۶ گرم در لیتر در همگن میوه خرمای فساد با غلظت ۷۵ گرم در لیتر به دست آمد. بیشترین سرعت تولید استون، بوتانول و اتانول به مقدار ۰/۳۰ گرم در لیتر در ساعت و بازده استون، بوتانول و اتانول به مقدار ۰/۴۲ در همگن میوه خرمای فساد با غلظت ۷۵ گرم در لیتر مشاهده شد. از مشارکت میکروبی بدون استفاده از عوامل کاهنده و روشن کننده استفاده شد. با افزودن ۵ گرم در لیتر عصاره مخمر و ۱/۶ گرم در لیتر نیترات آمونیوم به مخلوط همگن میوه خرمای فاسد، تولید استون، بوتانول و اتانول به طرز قابل توجهی افزایش یافت. ترکیب عصاره مخمر و نیترات آمونیوم به طور قابل توجهی تولید استون، بوتانول و اتانول را افزایش داد. با این نتایج پیشنهاد شد که استفاده از میوه‌های خرمای فاسد می‌تواند به طور موثر برای تولید تجاری استون، بوتانول و اتانول انجام شود.

۹-۹-۱۶ پسماند میوه‌های مخلوط

دبایریا و همکاران (2019) به طور مستقیم پسماند میوه را با استفاده از باکتری دریایی *سیتروباکتر* سویه E4 به اتانول تبدیل کردند. سویه‌های مقاوم به اتانول از آبهای دریایی دیگا و شانکارپور، بنگال غربی، هند استخراج شدند. این سویه‌ها برای تولید اتانول با استفاده از پسماند خانگی مختلف مورد تحلیل قرار گرفتند. این پسماند شامل کاغذ، پسماند آشپزخانه، پسماند باغ و پسماند میوه بودند. راندمان سویه E4 در تولید اتانول از طریق تخمیر پسماند آشپزخانه و میوه بالاترین بود. تولید ۲/۹۶ گرم در لیتر اتانول با استفاده از پسماند میوه از طریق

1. *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824

2. *Bacillus subtilis* DSM 4451

(کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا) گزارش شد. بازده تولید اتانول به صورت ۰/۱۳ گرم اتانول در گرم قند کاهنده موجود در پسماند میوه به دست آمد.

محمد و همکاران (2018)، تولید بیواتانول را از پسماند میوه‌ها و سبزیجات با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* انجام دادند. هدف از مطالعه حاضر تعیین درصد بیواتانول با استفاده از پسماند میوه‌ها و سبزیجات تولید شده از طریق تخمیر با استفاده از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* و تجزیه و تحلیل مقادیر شیمیایی و میزان گلوکز در تولید بیواتانول بود. آنها به این نتیجه رسیدند که حداکثر بازده بیواتانول با استفاده از پسماند آناناس به دست آمد. غلظت بالایی از عناصر در بیواتانول پرتقال ثبت شد. مقادیر گلوکز نیز در پسماند پرتقال بیشتر گزارش شده است.

کملش و همکاران (2019) از مخلوط سه میوه، یعنی موز، انگور و انبه به عنوان پیش نیاز ممکن برای تولید اتانول سلولزی با اصلاح پارامترهایی مانند هوادهی استفاده کردند. آماده سازی، هیدرولیز و تخمیر در این مطالعه انجام شد. از مخمر معروف *ساکارومایسس سرویزیه* RK1 استفاده شد. تخمیر تفاله میوه مخلوط بدون ساکارز و تفاله میوه با ساکارز به ترتیب ۰/۶۷ درصد اتانول و ۱/۳۲ درصد اتانول تولید کرد.

۹-۹-۱۷ میوه رامبوتان^۱

تولید بیواتانول توسط هادیل و همکاران (2011) با استفاده از رامبوتان پوسیده انجام شد. از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* برای تخمیر پسماند میوه رامبوتان استفاده شد. مقادیر شیمیایی، ویسکوزیته و ارزش اسیدی بیواتانول به دست آمده با استانداردهای مشخصه‌های استاندارد انجمن مواد و آزمون آمریکا سازگار بودند. مواد شیمیایی مضر در بیواتانول بسیار کم بودند.

۹-۹-۱۸ پوست پرتقال

تجزیه و تحلیل پوست پرتقال به عنوان خوراک تخمیر توسط اوبروی و همکاران (2010) انجام شد. شرایط فرآیند برای افزایش تولید اتانول مورد بررسی قرار گرفت. هیدرولیز اولیه پودر پوست پرتقال در غلظت اسیدی از ۰ تا ۱/۰ درصد (وزنی به حجمی) در دمای ۱۲۱ درجه

۱. مُژکی یا رامبوتان میوه گیاهی است با نام علمی سرخالوی مُژکی است. گوشته آن شفاف، ترد، سفید و گاه مایل به صورتی است و طعمی ترش و شیرین دارد.

سانتی گراد و فشار ۵ psi به مدت زمان ۱۵ دقیقه انجام شد. کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا قندها و ترکیبات بازدارنده، افزایش تولید هیدروکسی متی فورفورال و اسید استیک و کاهش غلظت قند را زمانی که سطح اسید فراتر از ۰/۵ درصد (وزنی به حجمی) بود، نشان داد. هیدرولیز ثانویه زیست توده پیش تصفیه شده که از هیدرولیز اولیه به دست آمده بود، با غلظت اسید ۰/۵ درصد (وزنی به حجمی) انجام شد. روش متداول سطح پاسخ با استفاده از سه عامل و طراحی مرکب مرکزی دو سطحی برای بهینه‌سازی تأثیرات دما، pH و زمان تخمیر بر تولید اتانول از هیدرولیز پودر پوست پرتقال با استفاده از منابع شیمیایی استفاده شد. این فرایند در سطح شیشه مخلوط انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایشات بهینه‌سازی و با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی عددی، یک بررسی اعتبارسنجی در یک تخمیر نیمه پیوسته با ظرفیت ۲ لیتر انجام شد. مقدار pH برابر با ۵/۴ و دما برابر با ۳۴ درجه سلسیوس بود و مدت زمان تخمیر ۱۵ ساعت بود. تخمیر جداگانه از هیدرولیزهای حاصل از فرایندهای هیدرولیز اولیه و ثانویه انجام شد. پارامترهای استفاده شده با استفاده از روش متداول سطح پاسخ بهینه‌سازی شدند. آن‌ها عملکردی برابر با ۰/۲۵ گرم اتانول بر گرم زیست توده و ۰/۴۶ گرم اتانول بر گرم پیش نیاز مصرف شده را به دست آوردند. بهره وری حجمی قابل توجهی از اتانول (۳/۳۷ گرم در لیتر در ساعت) با استفاده از این روش در سطح تخمیر به دست آمد. این نشان می‌دهد که در آینده مطالعات در مقیاس بزرگتری قابل انجام و نویدبخش هستند.

اتانول با استفاده از پوست پرتقال با استفاده از قارچ موکور/یندیکوس^۱ تولید شد (Ylivero 2008). پس از کشت اولیه هوازی بر روی پوست پرتقال هیدرولیز شده به وسیله آنزیم، عملکرد اتانول با میزان ۰/۳۳ گرم بر گرم، پس از مدت زمان ۲۶ ساعت به دست آمد. گرومن و همکاران (Grohmann et al. 1994, 1996) تولید اتانول را با استفاده از پوست پرتقال اثبات کردند. تبدیل مونوساکاریدهای موجود در هیدرولیزهای پوست پرتقال برای به دست آوردن اتانول با استفاده از باکتری/شریشیا کلی KO11 نو ترکیب در یک تخمیر نیمه پیوسته با pH کنترل شده در ماهای ۳۲ و ۳۷ درجه سانتیگراد مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر pH و غلظت هیدرولیزهای پوست میوه برای تعیین شرایط بهینه تقریبی و محدودیت‌های موجود در چنین تخمیرهایی متفاوت بود. عملکرد بسیار قابل توجهی از اتانول با استفاده از این میکروب در غلظت اتانول متوسط (۲۸-۴۸ گرم در لیتر) مشاهده شد. محدوده pH ۵/۶-۸/۲ مناسب به نظر می‌رسید. تمام مونوساکاریدهای اصلی موجود در هیدرولیز پوست

1. *Mucor indicus*

پرتقال توسط میکروارگانیسم برای به دست آوردن اتانول تبدیل شدند. مقادیر کمتری اسید استیک و اسید لاکتیک نیز تولید شد.

در تحقیقاتی که قبلاً درباره هیدرولیز پلی ساکاریدها در پوست پرتقال با استفاده از آنزیم انجام شده بود، مطالعات بیشتری انجام شد. در این مطالعات، آنزیم‌های سلولاز و پکتیناز موجود در بازار به غلظت‌های بیشتر و کاربردی‌تر در جامدات پوست پرتقال توسط گروه‌همان و همکاران در سال ۱۹۹۴ بهبود یافتند. این امر حتی در غلظت‌های بالای ۲۲ تا ۲۳ درصد همچنان صحت داشت. اگرچه میزان انحلال و ساکاره شدن دو تا سه برابر کاهش یافت. از مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* برای بررسی تخمیرپذیری چنین هیدرولیزهایی استفاده شد. این مطالعه وجود برخی از اجزای بازدارنده را نشان داد. برای حذف این اجزا، می‌توان پوست هیدرولیز شده را از طریق فیلتراسیون جدا کرد. پس از تنظیم pH با استفاده از کربنات کلسیم، تخمیر محلول هیدرولیز شده فیلتر شده با موفقیت انجام شد.

۹-۹-۱۹ عصاره سیب بادام هندی^۱

با استفاده از سلول‌های مخمر غیرفعال *ساکارومایسس سرویزیه*، تولید اتانول با استفاده از عصاره سیب بادام هندی توسط نیلاکاندان و اوشارانی (2009) مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط بهینه، حداکثر بازده اتانول (۷/۶۲ درصد) به دست آمد. شرایط بهینه شامل غلظت پیش نیاز ۱۰ درصد، pH برابر با ۶، دما - ۳۲/۵ درجه سانتیگراد و غلظت سلول‌های میکروبی افزوده شده به محیط ۸ درصد (وزنی به وزنی) در ۲۴ ساعت است. این مطالعه امکان استفاده موثر از عصاره سیب بادام هندی را برای تولید بیواتانول نشان داد. این را می‌توان با استفاده از پارامترهای بهینه تخمیر با استفاده از فناوری شامل سلول‌های مخمر غیرفعال به دست آورد.

۹-۹-۲۰ آلو جاوه‌ای^۲ و انبه

موتریجا و همکاران (2011) تولید اتانول را از آلو جاوه‌ای و انبه (مانژیفرا اندیکا) انجام می‌دهند. فرآیند ساکارزی کردن و تخمیر همزمان با استفاده از سلولاز نو ترکیب و مخمر *ساکارومایسس سرویزیه* انجام شد. سه روش آماده سازی، یعنی قلیایی، اسیدی و بخارتخت فشار انجام شد. آماده سازی اسیدی آلو جاوه‌ای در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد حداکثر اتانول

۱. به میوه درخت بادام هندی، سیب بادام هندی (Cashew apple) می‌گویند و بادام هندی یا کاشو (Cashew) دانه این میوه است.

۲. جمبو یا میوه جم یا آلو جاوه‌ای نام درخت میوه دار و همیشه سبزی است که در شهرها و مناطق ساحلی جنوب ایران می‌روید.

(۱/۲۱ گرم در لیتر) را به همراه داشت. آماده سازی قلیایی در انبه حداکثر اتانول (۰/۶۵۸ گرم در لیتر) را به همراه داشت.

۹-۱۰ نتیجه‌گیری

استفاده گسترده از اتانول به عنوان سوخت در سراسر جهان نیازمند فناوری‌هایی است که علاوه بر بهره‌وری اقتصادی، از لحاظ محیط زیستی نیز پایدار و سازگار باشد. گرایش‌های پژوهشی جاری برای بهبود تولید اتانول سوخت به ماهیت مواد خام استفاده شده، مراحل مربوط به فرآیند تولید و مسائل مربوط به مهندسی فرآیند بستگی دارد. میوه‌های موز و باقی مانده‌های آن (آلی) مواد اولیه‌ای هستند که قابلیت استفاده برای تولید اتانول را دارند. این را می‌توان از طریق هیدرولیز، تخمیر و تقطیر به دست آورد. با رعایت چنین روش‌هایی می‌توان از پسماند کشاورزی برای تولید اتانول و کاهش مسائل مربوط به محیط زیست استفاده کرد. بیواتانولی که با استفاده از زیست توده با موز تولید می‌شود، از نظر کیفیت مناسب است. می‌توان از آن برای اجرای موتورهای حمل و نقل استفاده کرد. گزارش شده است که این نوع سوخت کمترین میزان آلاینده‌ها را تولید می‌کند. علاوه بر این، می‌توان از آن در روش‌های بازیافت محیطی برای مدیریت پسماندها استفاده کرد. مقادیر قابل توجهی از اتانول می‌تواند از سیستم‌های تولید بازاریابی شده با استفاده از دسته‌های موز تولید شود که با استانداردهای کیفیت مطابقت ندارند. اتانول همچنین می‌تواند از سیستم‌های کشاورزی-جنگلی با ورودی کم تولید شود. در چنین سیستم‌هایی، کشت گونه موز به عنوان یک محصول فرعی انجام می‌شود و بخشی از دسته‌های موز که با استانداردهای کیفیت مطابقت ندارند، در مزارع به صورت جزئی رها می‌شوند. پسماند پوست لیمو مرکبات یکی دیگر از مواد اولیه بالقوه است که می‌توان آن را برای تولید بیواتانول سازگار و اسید گالاکتورونیک استفاده کرد. پردازش از طریق فرآیند همزمان تبدیل به قند و تخمیر پوست لیمو مرکبات با روش بخار تحت فشار، حتی با غلظت آنزیمی کم، مقادیر قابل توجهی از اتانول تولید می‌کند.

فرآیند همزمان تبدیل به قند و تخمیر می‌تواند برای هر دو پسماند نارنگی پاکستانی و پوست موز انجام شود. این منابع هنوز برای این کاربردهای صنعتی به طور تجاری بهره‌برداری نشده‌اند. آن‌ها به طور نامناسب مدیریت می‌شوند، اما می‌توانند به طور موثری برای تولید اتانول استفاده شوند. تفاله سیب، پوست انبه و پسماند انبه نیز می‌توانند برای تولید اتانول استفاده شوند. پسماند آناناس مقدار نسبتاً کمتری قند برای تخمیر الکل دارند. از این رو، پیش

تصفیه برای افزایش سطح قند مورد نیاز است. با استفاده از غلظت بالای پیش نیاز برای تخمیر، بازده اتانول افزایش یافت.

برای تولید بیواتانول، پسماند آناناس می‌تواند به عنوان یک ماده اقتصادی مورد استفاده قرار گیرد. صنایع آناناس بخشی از پسماندهای خود را به طور جزئی در فرآوری و استفاده مجدد استفاده می‌کنند. میوه‌های فاسد شده خرما نیز می‌توانند به عنوان یک پیش نیاز قابل تجدیدپذیر و ارزان برای تولید استون، بیواتانول و اتانول مورد استفاده قرار گیرند. باید تمرکز بیشتری برای تعیین نحوه بهبود استفاده اقتصادی از اتانول تولید شده صورت پذیرد. با استفاده از اتانول تولید شده، تولیدکنندگان می‌توانند مصرف بنزین در مزارع را جایگزین کنند یا آن را در بازار منطقه‌ای به عنوان اتانول به فروش برسانند.

حذف قابل توجه لیگنین از باقی مانده‌های پوست زیست توده میوه منجر به افزایش تولید اتانول شد. استفاده از آنزیم‌های سلولاز نو ترکیب برای تولید بیواتانول یک روش برای کاهش هزینه آنزیم است. بدون شک، قابلیت برای افزایش بازده اتانول از طریق بهینه‌سازی فرآیند وجود دارد. انجام فرآیند با شرایط بهینه تخمیر می‌تواند به منظور ارتقای مقیاس به مقیاس پایلوت و سپس به سطح یک تخمیر تجاری استفاده شود. این باعث می‌شود که کل فرآیند اقتصادی شود. پسماند میوه یک ماده لیگنوسلولزی جذاب برای تولید بیواتانول است. این امر به این دلیل است که پسماند میوه‌ها فراوان‌ترین منابع تجدیدپذیر هستند. انتخاب روش‌های آماده سازی صحیح به افزایش کارایی تبدیل به قند آنزیمی کمک می‌کند و از این رو کل فرآیند را مقرون به صرفه می‌کند. استفاده از سلولازهای نو ترکیب برای تولید بیواتانول یک روش هوشمندانه برای کاهش هزینه آنزیم است.

منابع

- AFDC (2019) Alternative fuels data center. <https://afdc.energy.gov/data/10331>
- Ahmeh JB, Okagbue RN, Ahmadm AA, Ikediobi CO (1988) Ethanol production from corn-corb wastes and grass-straw. *Nig J Biotechnol* 6:110–112
- Akhtar J, Kuang SK, Amin NS (2010) Liquefaction of empty palm fruit bunch (EPFB) in alkaline hot compressed water. *Renew Energy* 3(5):1220–1227
- Alain K, Georges AN, Aka Y (1987) Ethanol production from pineapple cannery juice in Co'te d'Ivoire with preselected yeast strains. *J Ferment Technol* 65:475–481
- Anonymous (2004) By-products and waste utilization (value addition of mango processing waste). *Food Digest* 27:14–17

- Arredondo HIV, Ruiz-Colorado AA, De Oliveira S Jr (2010) Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: energy analysis. *Energy* 35:3081–3087
- Arumugam R, Manikandan M (2011) Fermentation of pretreated Hydrolyzates of Banana and mango fruit wastes for ethanol production. *Asian J Exp Biol Sci* 2(2):246–256
- Balasubramanian K, Ambikapathy V, Panneerselvam A (2011) Studies on ethanol production from spoiled fruits by batch fermentations. *J Microbiol Biotech Res* 1(4):158–163
- Ban-Koffi L, Han YW (1990) Alcohol production from pineapple waste. *World J Microbiol Biotechnol* 6:281–284
- Boluda-Aguilar M, López-Gómez A (2013) Production of bioethanol by fermentation of lemon (*Citrus limon* L.) peel wastes pretreated with steam explosion. *Ind Crop Prod* 41:188–197
- Boluda-Aguilar M, García-Vidal L, González-Castáneda FP, López-Gómez A (2010) Mandarin peel wastes pretreatment with steam explosion for bioethanol production. *Bioresour Technol* 101:3506–3513
- Braddock RJ (1999) *Handbook of citrus by-products and processing technology*. Wiley, Hoboken, NJ
- Campo ID, Alegria I, Zazpe M, Echeverria I (2006) Diluted acid hydrolysis pretreatment of agrifood wastes for bioethanol production. *Ind Crop Prod* 42:214–221
- Carrasco J, Martínez M, Pérez J, Molina A (1992) La Hidrólisis Ácida como Tecnología para el Fraccionamiento de la Biomasa Lignocelulósica (IyII). In: *Ingeniería Química de España*, pp 195–200
- Chantanta DK, Attri C, Gopal K, Devi M, Gupta G, Bhalla TC (2008) Bioethanol production from apple pomace left after juice extraction. *Internet J Microbiol* 5(2):1–5
- Christensen K, Smith A (2008) The case for hemp as a biofuel. *Vote Hemp*, Brattleboro, VT
- Chye TT, Meng LC (1975) Industrial alcohol from pineapple waste. *J Singapore Natl Acad Sci* 4: 152–154
- Clarke WP, Radnidge P, Lai E, Jensen PD, Hardin MT (2007) Digestion of waste bananas to generate energy in Australia. *Waste Manag* 28(3):527–533. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.012>
- Classen PAM, Sijistsma L, Stams AJM, Deveries SS, Westhuls RA (1999) Utilization of the biomass for the supply of energy carries. *Appl Microbiol Biotechnol* 52:741–755
- De Fraiture C, Giordano M, Liao Y (2008) Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy. *Water Policy* 1(Suppl. 10):67–81
- Debapriya S, Kriti G, Kasturi P, Rimi B, Angana S (2019) Direct conversion of fruit waste to ethanol using marine bacterial strain *Citrobacter* sp. E4. In: *Process safety and environmental protection*, pp 203–210
- Desmond RL (1995) The Pawpaw (*Asimina triloba* (L.) Dunal). In: *New crop fact sheet*, pp 1–5
- Dhabekar A, Chandak A (2010) Utilization of banana peels and beet waste for alcohol production. *Asiatic J Biotech Res* 01:8–13
- Dhillon SS, Gill RK, Gill S, Singh M (2004) Studies on the utilization of citrus peel for pectinase production using fungus *aspergillus Niger*. *Int J Environ Stud* 61:199–210

- Ensinas AV, Modesto M, Nebra S, Serra L (2009) Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy* 34:6808
- EPA (2010) Fuel economy guide: 2010. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy
- Essien JP, Akpan EJ, Essien EP (2005) Studies on mould growth and biomass production using waste banana peel. *Bioresour Technol* 96:1451–1456
- FAO (2008) The role of agricultural biotechnologies for production of bioenergy in developing countries. In: Electronic forum on biotechnology in food and agriculture: Conference 15 from 10 Nov. to 14 December. Accessed 25 Aug 2009
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) (2003) FAOSTAT statistics data base. FAO, Rome
- Garcia-Castello E, Lora-Garcia J, Garcia-Garrido J, Rodriguez-Lopez AD (2006) Energetic comparison for leaching waste liquid from citric juice production using both reverse osmosis and multiple-effect evaporation. *Desalination* 191:178–185
- Grohmann K, Baldwin EA, Buslig BS (1994) Production of ethanol from enzymatically hydrolysed orange peel by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Appl Biochem Biotechnol* 45(46):315–327
- Grohmann K, Cameron RG, Buslig BS (1995a) Fermentation of sugars in orange peel hydrolysates to ethanol by recombinant *Escherichia coli* K011. *Appl Biochem Biotechnol* 51:423–435
- Grohmann K, Cameron RG, Buslig BS (1995b) Fractionation and pretreatment of orange peel by dilute acid hydrolysis. *Bioresour Technol* 54:129–141
- Grohmann K, Cameron RG, Buslig BS (1996) Fermentation of orange peel hydrolysates by ethanologenic *Escherichia coli*. Effects of nutritional supplements. *Appl Biochem Biotechnol* 57–58:383–388
- Guneseelan NV (2004) Biochemical methane potential of fruits and vegetables solid waste feedstocks. *Biomass Bioenergy* 26:389–399
- Hadeel A, Hossain ABMS, Latifa K, Naqeb HAL, Abear J, Norah AH (2011) Bioethanol fuel production from rambutan fruit biomass as reducing agent of global warming and greenhouse gases. *Afr J Biotechnol* 10(50):10157–10165
- Hammond JB, Egg R, Diggins D, Coble CG (1996) Alcohol from bananas. *Bioresour Technol* 56: 125–130
- Hang YD (1988) Improvement of the nutritional value of apple pomace by fermentation. *Nutr Rep Int* 38(1):207–210
- Hang YD, Lee CY, Woodams EE (1982) A solid state fermentation system for production of ethanol from apple pomace. *J Food Sci* 47:1851–1852
- Hemalatha B (2012) Vermicomposting of fruit waste and industrial sludge. *Int J Adv Eng Technol* 3(2):60–63
- Hinman Norman D, Wright John D, William H, Wyman Charles E (1989) Xylose fermentation. *Appl Biochem Biotechnol* 20/21:391–401
- Hossain ABMS, Fazlany AR (2010) Creation of alternative energy by bio-ethanol production from pineapple waste and the usage of its properties for engine. *Afr J Microbiol Res* 4(9):813–819

- Hossain ABMS, Ahmed SA, Alshammari AM, Adnan FMA, Annuar MSM, Mustafa H, Hammad N (2011) Bioethanol fuel production from rotten banana as an environmental waste management and sustainable energy. *Afr J Microbiol Res* 5(6):586–598
- Isarankura NA, Tantimongcolwat T, Kongpanpee T, Prabkate P, Prachayasittikul V (2007) Appropriate technology for the bioconversion of water hyacinth to liquid ethanol: future prospects for community strengthening and sustainable development. *EXCLI J* 6:167–176
- Jain A, Singh A (2006) Ethanol production from apple pomace in natural and inoculated fermentation. M.Tech. Thesis. GBPUA & T Pantnagar, India
- Kamlesh RS, Rani V, Gayatri P (2019) Bioethanol production from pulp of fruits. *Oryzae Biosci Biotechnol Res Commun* 12(2):464–471
- Kandari V, Gupta S (2012) Bioconversion of vegetable and fruit peel wastes in viable product. *J Microbiol Biotech Res* 2(2):308–312
- Kaur M (1989) Microbial transformation of apple pomace to recover industrial products. M.Sc. (Hons) Thesis. Punjab University, Chandigarh
- Khosravy DK, Shojaosadati SA (2003) A solid state fermentation system for production of ethanol from apple pomace. *Mod Tech Eng J* 10:55–61
- Kojima M, Johnson T (2005) Potential for biofuels for transport in developing countries. Energy Sector Management Assistance Programme, Joint UNDP/World Bank, Washington, DC
- Korkie LJ, Janse BJH, Viljoen-Bloom M (2002) Utilising grape pomace from ethanol production. *S Afr J Enol Vitic* 23(1):31–36
- Kumakura M, Xin LZ (1993) Effect of radiation pretreatment on enzymatic hydrolysis of rice straw with low concentrations of alkali solution. *Bioresour Technol* 43:137
- Kumar G, Sahgal M (2008) Production of ethanol from apple pomace using yeast strain with improved fermentation under solid state. M.Sc. Thesis (Microbiology). GBPUA & T Pantnagar, India
- Lalitha G (2011) Pretreatments used for fruit biomass peel residue to yield ethanol production. *Recent Res Sci Technol* 3(11):87–90
- Lalitha G, Rajeswari S (2011) Use of fruit biomass peel residue for ethanol production. *Int J Pharm Biol Sci* 2(2):B15–B23
- Lin Y, Tanaka S (2006) Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Appl Microbiol Biotechnol* 69:627–642
- Linden T, Hahn-Hägerdal B (1989) Fermentation of lignocellulosic hydrolysates with yeast and xylose isomerase. *Enzyme Microb Technol* 11:583–589
- Madhukara K, Krishnanad N, Srilatha HR (1993) Ensilage of mango peel for methane generation. *Process Biochem* 28:119–123
- Mahawara M, Singh A, Jalgaonkar K (2012) Utility of apple pomace as a substrate for various products: a review. *Food Bioprod Process* 90(4):597–605
- Mahro B, Tim M (2007) Potential of biowaste from the food industry as a biomass resource. *Eng Life Sci* 7(5):457–468
- Manikandan K, Sreenivasan V, Viruthagiri T (2008) Kinetics studies on ethanol production from banana peel waste using mutant strain *S. cerevisiae*. *Indian J Biotechnol* 7:83–88

- Marín FR, Soler-Rivas C, Benavente-García O, Castillo J, Pérez-Alvarez JA (2007) By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food Chem* 100:736–741
- Mielenz JR, Bardsley JS, Wymana CE (2009) Fermentation of soybean hulls to ethanol while preserving protein value. *Bioresour Technol* 100:3532–3539
- Miller JE, Weathers PJ, McConville FX, Goldberg M (1982) Saccharification and ethanol fermentation of apple pomace. *Biotechnol Bioeng Symp* 12:183–191
- Mishra J, Kumar D, Samanta S, Vishwakarma MK (2012) A comparative study of ethanol production from various agro residues by using *Saccharomyces cerevisiae* and *Candida albicans*. *J Yeast Fungal Res* 3(2):12–17
- Mitchell D (2008) A note on rising food prices. World Bank development prospects group. World Bank, Washington, DC
- Mohamed HA, Abdel-Wahab EE (2012) Production of acetone-butanol-ethanol from spoilage date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits by mixed culture of *Clostridium acetobutylicum* and *Bacillus subtilis*. *Biomass Bioenergy* 42:172–178
- Mohammad P, Gergely F, Horvát IS, Niklasson C, Taherzadeh MJ (2010) Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresour Technol* 101:4246–4250
- Mohammad MK, Khadijah Binti Q, Ali M, Dalorima T, Mohammad HS, Hossain ABS (2018) Bio-ethanol production from fruit and vegetable waste by using *Saccharomyces cerevisiae*. *Biosci Res* 15(3):1703–1000
- Murphy JD, Power N (2009) Technical and economic analysis of biogas production in Ireland utilising three different crop rotations. *Appl Energy* 86:25–36
- Mutreja R, Das D, Goyal D, Goyal A (2011) Bioconversion of agricultural waste to ethanol by SSF using recombinant cellulase from *Clostridium thermocellum*. *Enzyme Res* 2011:340279. 6 pages
- Neelakandan T, Usharani G (2009) Optimization and production of bioethanol from cashew apple juice using immobilized yeast cells by *Saccharomyces cerevisiae*. *Am Eur J Sci Res* 4(2):85–88
- Ngadi MO, Correia LR (1992) Kinetics of solid state fermentation from apple pomace. *J Food Eng* 17:97–116
- Nigam (1999) Continuous ethanol production from pineapple cannery waste. *J Biotechnol* 72:197–202
- Oberoi HS, Vadlani PV, Madl RL, Saida L, Abeykoon JP (2010) Ethanol production from orange peels: two stage hydrolysis and fermentation studies using optimized parameters through experimental design. *J Agric Food Chem* 58:3422–3429
- Oberoi HS, Praveen VV, Saida L, Bansal S, Hughes JD (2011a) Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. *Waste Manag* 31(7):1576–1584
- Oberoi HS, Praveen VV, Ananda N, Sunil B, Sandeep S, Simranjeet K, Neha B (2011b) Enhanced ethanol production from Kinnow mandarin (*Citrus reticulata*) waste via a statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. *Bioresour Technol* 102(2):1593–1601
- Oliveira ME, Vaughan BE, Rykiel EJ (2005) Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. *BioScience* 55(7):593–602

- Onwuka CFI, Adetiloye PO, Afolami CA (1997) Use of household wastes and crop residues in small ruminant feeding in Nigeria. *Small Rumin Res* 24:233–237
- Osanaïye Akin BC, Nzelibe HC, Agbaji AS (2005) Production of ethanol from *Carica papaya* (pawpaw) agro waste: effect of saccharification and different treatments on ethanol yield. *Afr J Biotechnol* 4(7):657–659
- Oyeleke SB, Jibrin NM (2009) Production of bioethanol from Guinea cornhusk and millet husk. *Afr J Microbiol Res* 3(4):147–152
- Pandey A, Soccol CR, Nigam P, Soccol VT (2000) Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: Sugarcane bagasse. *Bioresour Technol* 74:69–80
- Petersson A, Thomsen MH, Hauggaard-Nielsen H, Thomsen AB (2007) Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean. *Biomass Bioenergy* 31:812–819
- Pimentel D, Patzek TW (2005) Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Nat Resour Res* 14:65–76
- Prados DM, Seguí L, Fito P (2010) Industrial pineapple waste as a feasible source to produce bioethanol. International conference on Food innovation, Food innova 25th–29th October 2010. Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo (IUIAD), Universidad Politécnica de Valencia, camino de Vera s/n, C.P. 46822, Valencia, Spain
- Pramanik K, Rao DE (2010) Kinetic study on ethanol fermentation of grape waste using *Saccharomyces cerevisiae* yeast isolated from toddy. *IE (I) J* 85:53–58
- Prior BA, Lategan PM, Botes PJ, Potgieter HJ (1980) Ethanol production from pineapple cannery effluent. *J South Afr Food Rev* 71:120–123
- Reddy LV, Reddy OVS, Wee Y-J (2011) Production of ethanol from mango (*Mangifera indica* L.) peel by *Saccharomyces cerevisiae* CFTRI101. *Afr J Biotechnol* 10(20):4183–4189
- Rocha M, Souza VP, Machiel R (2007) *Appl Biochem Biotechnol* 136(140):185–194
- Sandhu SK, Oberoi HS, Dhaliwal SS, Babbar N, Kaur U, Nanda D, Kumar D (2012) Ethanol production from Kinnow mandarin (*Citrus reticulata*) peels via simultaneous saccharification and fermentation using crude enzyme produced by *aspergillus oryzae* and the thermotolerant *Pichia kudriavzevii* strain. *Ann Microbiol* 62(2):655–666
- Senthilguru K, George TS, SankaranarayananVasanthi N, Kannan KP (2011) Ethanol production from lignocellulosic waste. *World J Sci Technol* 1(11):12–16
- Seong Choi I, Kimb J-H, Wic SG, Kimd KH, Baea H-J (2012) Bioethanol production from mandarin (*Citrus unshiu*) peel waste using popping pretreatment. *Appl Energy* 102:204–210
- Sharma N, Kalra KL, Oberoi HS, Bansal S (2007) Optimization of fermentation parameters for production of ethanol from kinnow waste and banana peels by simultaneous saccharification and fermentation. *Indian J Microbiol* 47:310–316
- Shyam Kumar R, Ganesh Moorthy I, Rajeshwari R, Harikrishnan H (2011) Utilization of waste ripe Banana, and peels for bio ethanol production using *Saccharomyces cerevisiae*. *J Biosci Res* 2(2):67–71
- Smith AM (2008) Prospects for increasing starch and sucrose yields for bioethanol production. *Plant J* 54:546–558

- Sophie G, Dufoura D, Giraldoa A's, Munoz LA, Mora P, Solisc H, Garcesd H, Gonzalez A (2011) Energy and carbon footprints of ethanol production using banana and cooking banana discard: a case study from Costa Rica and Ecuador. *Biomass Bioenergy* 35:2640–2649
- Talebni F, Pourbafrani M, Lundin M, Taherzadeh MJ (2008) Optimization study of citrus wastes saccharification by dilute-acid hydrolysis. *Bioresources* 3(1):108–122
- Tanaka K, Hilary ZD, Ishizaki A (1999) Investigation of the utility of pineapple and pineapple waste material as low-investigation of the utility of pineapple juice and pineapple waste cost substrate for ethanol fermentation by *Zymomonas mobilis*. *J Biosci Bioeng* 87(5):642–646
- Teles PAD, Ponte RMV, Macedo GR, Goncalves LRB (2007) Evaluation of cashew apple juice for the production of fuel ethanol. *Appl Biochem Biotechnol* 148:227–234
- Tewari HK, Marwaha SS, Rupal K (2003) Ethanol from banana peels. *Agric Wastes* 16(2):135–146
- Tock JY, Lai CL, Lee KT, Tan KT, Bhatia S (2009) Banana biomass as potential renewable energy resource: a Malaysian case study. *Renew Sustain Energy Rev* 14:798–805. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.010>
- United Nations (2007) UN—energy sustainable bioenergy: a framework for decision makers. United Nations, New York
- Wang MG (2000) Transportation fuel-cycle model. Argonne National Laboratory, Lemont, IL
- War A, Singhs D (2010) Influence of tebuconazole residues on the aroma composition of Mencia red wines. *Food Chem* 124(1):1525–1532
- Widmer W, Weiyang Z, Karel G (2010) Pretreatment effects on orange processing waste for making ethanol by simultaneous saccharification and fermentation. *Bioresour Technol* 101:5242–5249
- Wilkins MR (2009) Effect of orange peel oil on ethanol production by *Zymomonas mobilis*. *Biomass Bioenergy* 33:538–541
- Wilkins MR, Suryawati L, Chrz D, Maness NO (2007a) Ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* in the presence of orange peel oil. *World J Microbiol Biotechnol* 23:1161–1168
- Wilkins MR, Widmer WW, Grohmann K (2007b) Simultaneous saccharification and fermentation of citrus peel waste by *Saccharomyces cerevisiae* to produce ethanol. *Process Biochem* 42: 1614–1619
- Wilkins MR, Widmer WW, Grohmann K, Cameron RG (2007c) Hydrolysis of grapefruit peel waste with cellulase and pectinase enzymes. *Bioresour Technol* 98:1596–1601
- Wyman CE (1994) Ethanol from lignocellulosic biomass: technology, economics, and opportunities. *Bioresour Technol* 50:3–15
- Wyman CE (1996) Handbook on ethanol: production and utilization. Taylor & Francis, Bristol, Paris, France
- Wyman CE (2001) Twenty years of trials, tribulations, and research progress in bioethanol technology. *Appl Biochem Biotechnol* 91:5–21
- Ye C, Ratna RSS, Chengci C (2007) Ensiling agricultural residues for bioethanol production. *Appl Biochem Biotechnol* 143:80–92

- Ylitrero P (2008) Production of ethanol and biomass from orange peel waste by *Mucor indicus*. M. Sc thesis. University College of Borås School of Engineering, Borås
- Yong KTL, Lee KT, Mohamed A, Bhatia S (2007) Potential of hydrogen from oil palm biomass as a source of renewable energy worldwide. *Energy Policy* 35:5692–5701
- Yoosin S, Sorapipatana C (2007) A study of ethanol production cost for gasoline substitution in Thailand and its competitiveness. *Thammasat Int J Sci Techno* 12:69–80
- Young Hoon J, Kim IJ, Han J-I, Choi I-G, Kim KH (2011) Aqueous ammonia pretreatment of oil palm empty fruit bunches for ethanol production. *Bioresour Technol* 102:9806–9809
- Zhang P, Whistler RL, Be Miller JN, Hamaker BR (2005) Banana starch: Production, physicochemical properties, and digestibility a review. *Carbohydr Polym* 59:443–458
- Zhou W, Widmer W, Grohmann K (2007) Economic analysis of ethanol production from citrus peel waste. *Proc Fla State Hort Soc* 120:310–315
- Zhou W, Widmer W, Grohmann K (2008) Developments in Ethanol Production from Citrus Peel Waste. *Proc Fla State Hort Soc* 121:307–310

روند تولید بیودیزل از جلبک‌ها و پسماند چربی حیوانی: چالش‌ها و چشم اندازها

چکیده: در چند دهه اخیر، استفاده حداکثری و کنترل نشده از سوخت‌های فسیلی به دلیل نیازهای شدید انرژی، سراسر جهان در جستجوی منابع انرژی تجدیدپذیر و قابل تجزیه قرار گرفته است. منابع انرژی تجدیدپذیر به محیط زیست آسیب نمی‌رساند. برای این منظور سوخت‌های نفتی با سوخت‌های زیستی جایگزین می‌شوند. سوخت‌های زیستی دوستدار محیط زیست و مقرون به صرفه هستند. ثابت شده است که بیودیزل جذاب‌ترین سوخت در چند سال اخیر بوده و می‌توان آن را از جلبک‌ها، پسماند چربی حیوانی و روغن‌های مصرف شده آشپزی به‌دست آورد. استفاده از سوخت با گزارش آلاینده‌گی کم یا بدون آلاینده‌گی ایمن است. جلبک‌ها گروهی گسترده از آبزیان هستند. و می‌توانند به عنوان منبع مواد مغذی برای تولید بیودیزل استفاده شوند. آنها به راحتی قابل رشد هستند و ویژگی‌های خاصی دارند. این ویژگی‌ها منجر به تولید قابل توجهی بیودیزل می‌شود. منبع بزرگ دیگر بیودیزل، پسماند چربی حیوانی است که به دلیل حداکثر استفاده از مرغ و گوشت در زندگی روزمره، به راحتی قابل دستیابی است. صرف نظر از دسترسی آسان به این منابع، هنوز برخی مسائل مانند شرایط آماده سازی، رشد جلبک و ... وجود دارد که برای تولید قابل توجه بیودیزل باید حل شود. برای دستیابی به اقتصاد سوخت‌های زیستی سازگار با محیط زیست، باید به طور جامع و جزئیات درمورد تأثیرات محیطی این سوخت‌ها آگاهی داشت. استفاده از سوخت‌های زیستی سازگار با محیط زیست، با تأثیر کمتری بر تغییرات آب و هوا و حفظ محیط زیست، می‌تواند انرژی سازگار با محیط زیست تولید کند و از منابع تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی مانند نفت استفاده کند.

کلمات کلیدی: سوخت فسیلی، سوخت نفتی، سازگار با محیط زیست، بیودیزل، جلبک، پسماند چربی حیوانی

۱-۱۰ مقدمه

در چند دهه اخیر، استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل نیازهای شدید انرژی افزایش یافته است. افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث ایجاد معایب زیست‌محیطی شدیدی شده است. این معایب منجر به کشف برخی جایگزین‌های سوخت در صنایع شده است. در حال حاضر بخش حمل و نقل اتحادیه اروپا تقریباً ۳۰ درصد از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. این مقدار انرژی مصرفی عمدتاً بستگی به استفاده از سوخت نفتی است. استفاده از سوخت‌های نفتی به عنوان منبع انتشار آلاینده‌ها شناخته می‌شود و به دلیل ذخایر رو به کاهش آن غیرقابل توجیه در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، نیاز به توسعه جایگزین انرژی دیزلی غیر سمی و تجدیدپذیر وجود دارد و توجه و بررسی دقیق عمومی را در جامعه علمی به خود جلب کرده است. سوخت‌های زیستی مایع یک انتخاب تجدیدپذیر و مقرون به صرفه برای متعادل کردن سوخت نفتی هستند (Lourinho and Brito 2015). به دلیل کاهش ذخایر نفت و تولید گازهای سمی از گازوییل نفتی، بیودیزل در چند سال اخیر به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست جذابیت بیشتری یافته است. علاوه بر این، بیودیزل زیست تخریب پذیر است زیرا کاملاً با استفاده از روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی ساخته می‌شود. بیودیزل گوگرد کمی همراه با فلزات و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای دارد، در حالی که گازوئیل پتروشیمی ممکن است تا ۲۰ درصد هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای داشته باشد (Vasudevan and Briggs 2008).

بیودیزل می‌تواند به عنوان ترکیبی از مونوالکیل استرهای مشتقات اسیدهای چرب زنجیره ای گسترده از منابع طبیعی تجدید پذیر مانند چربی‌های حیوانی، روغن‌های گیاهی، روغن جلبک و باقیمانده روغن پخت و پز متمایز باشد (Banković-Ilić et al. 2012; Yan et al. 2014; Lourinho and Brito 2015; Priya and Thirumarimurugan 2020). بیودیزل به عنوان یک منبع سوخت، مزایای بسیاری نسبت به گازوئیل نفتی دارد. بیودیزل غیرسمی و قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی بیش از چهار برابر سریع‌تر را نسبت به سوخت نفتی دارد (Tariq et al. 2012; Lourinho and Brito 2015). بیودیزل تقریباً هیچ گونه گوگردی را ندارد و گزارش آلاینده‌های آن نسبتاً کم است. همچنین، کارایی احتراق بهتر و نقطه اشتعال بهتری دارد. علاوه بر این، بیودیزل قابل تجدید و ایمن است و می‌توان آن را بدون نیاز به تغییر موتورهای موجود استفاده کرد (Helwani et al. 2009a, b; Abbaszaadeh et al. 2015; Aransiola et al. 2012).

بیودیزل را می‌توان با تبدیل چربی‌های حیوانی، روغن‌های گیاهی و روغن آشپزی از طریق فرآیندی به نام ترانس استریفیکاسیون به دست آورد (Kour et al. 2019). سه روش برای تولید بیودیزل از روغن و چربی‌ها وجود دارد (شکل ۱۰-۱). بیودیزل می‌تواند با استفاده از سویا، آفتابگردان، جاتروفا و میوه‌های نخل تولید شود. بیودیزل حاصل از روغن گیاهی معمولاً ۵۰ درصد گران‌تر از بیودیزل حاصل از روغن مصرف شده آشپزی است (Phan and Phan 2008). میکروارگانیسم‌های روغنی مانند باکتری‌ها، جلبک‌ها، سیانوباکتری‌ها و مخمرها نیز در تولید بیودیزل استفاده می‌شوند. برخی از گونه‌های مخمر مانند *لیپومیسیس لیپوفر*^۱، *رودوسپورییدیوم تورولویدس*^۲، *تریکوسپورون پولولانس*^۳ و *کریپتوکوک آلبیدوس*^۴ برای تولید چربی‌ها توانمند هستند (Meng et al. 2009; Fu et al. 2018; Kour et al. 2019).



شکل ۱۰-۱. مسیرهای اساسی برای تولید بیودیزل با استفاده از روغن‌ها و چربی‌ها (Kour et al. 2019)

در حال حاضر مانع اصلی در تجاری سازی و تولید گسترده بیودیزل، هزینه‌های تولید آن است (Abbaszaadeh et al. 2012).

در نتیجه تحقیقات گسترده ای بر روی تولید بیودیزل از فناوری‌های مختلف انجام می‌شود. چهار روش اصلی برای تولید بیودیزل وجود دارد (Abbaszaadeh et al. 2012; Lourinho and Brito 2015). این چهار روش مانند ترانس استریفیکاسیون ناهمگن قابلیت زیادی برای غلبه بر مسائل اصلی ناشی از تولید سنتی بیودیزل توسط کاتالیزورهای همگن دارند. با این حال، به دلیل انتقال جزئی جرم که با مشکلات انتشار بین فازها مواجه است، نمی‌توان این فناوری‌ها را بیشتر بهبود بخشید، زیرا فرآیند تبدیل روغن به استرها کمی کند است (Leung et al. 2010; Lam and Lee 2010; Lourinho and Brito 2015).

1. *Lipmyces lipofer*
2. *Rhodospiridium toruloides*
3. *Trichosporon pullulan*
4. *Cryptococcus albidus*

روش‌های اولیه تولید بیودیزل:

۱. استفاده مستقیم از روغن گیاهی
۲. میکروامولسیون
۳. ترک خوردگی حرارتی
۴. ترانس استریفیکاسیون کاتالیزوری آنزیمی

۱۰-۲ تولید بیودیزل با استفاده از جلبک

جلبک‌ها گروه گسترده‌ای از موجودات آبزی هستند. جلبک‌ها قابلیت انجام فتوسنتز و تبدیل بازده از انرژی خورشیدی را دارند. آنها می‌توانند بر اساس اندازه خود به دو گروه تقسیم شوند: (۱) جلبک‌های بزرگ و (۲) ریزجلبک‌ها (Koutra et al. 2018; Kour et al. 2019). اولین شکل اولیه جلبک که در زمین ظاهر شد، ریزجلبک‌ها بودند و در حال حاضر به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، تبدیل به یک هدف اصلی برای تولید بیودیزل شده است (Falkowski et al. 2004). سوخت‌های زیستی در واقع یک روش برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی و ذخیره آن در ترکیبات شیمیایی با بالاترین سطح انرژی هستند. منابع تغذیه با توانایی بالا در استفاده از انرژی خورشیدی از طریق فتوسنتز، برای تولید سوخت‌های زیستی بسیار مورد نیاز هستند (Fan and Burton 2009).

۱۰-۳ فرآیندهای تولید جلبک و فرآورده‌های تبدیل

فرآیند تولید جلبک‌ها را می‌توان بر اساس منبع انرژی و روش عملکرد به سه دسته‌بندی گسترده تقسیم کرد: هتروتروف، فتووتوتروف و میکسوتروف. این حالت‌های رشد می‌توانند در سیستم‌های بیوراکتورهای بسته و برکه‌های روباز اتفاق بیافتند (Chen et al. 2011; Juneja et al. 2013). برای حداکثر بازده سوخت زیستی، طرح‌های مختلفی شامل ترکیبی از سیستم رشد متنوع در بیوراکتورها پیشنهاد شده‌اند. بسته به سیستم رشد و پیکربندی بیوراکتور، خوراک جلبک را می‌توان از طیف وسیعی از پیش نیازها مانند مواد لیگنوسلولزی، شکر از شیر یا نشاسته تولید کرد (Brennan and Owende 2010; Juneja et al. 2013). بخش‌های نشاسته و چربی جلبک‌ها می‌توانند با انجام روش‌های فنی پردازش متنوعی مانند مایع‌سازی ترموشیمیایی (Zou et al. 2009)، پیرولیز (Du et al. 2011)، ترانس استریفیکاسیون (Sharma and Singh 2009) و تخمیر (Ueno et al. 1998) به سوخت مایع تبدیل شوند. مزایا و معایب این فرآورده‌های تبدیل در جدول ۱۰-۱ فهرست شده است. وجود مقادیر رطوبت کم در زیست توده جلبکی در روش‌های فنی تبدیل ترموشیمیایی مانند پیرولیز، سوزاندن و

تبدیل به گاز، چالش‌هایی را ایجاد می‌کند. این چالش به دلیل نیاز به مصرف انرژی بیشتر برای خشک کردن منابع تغذیه جلبکی و رسیدن به مقادیر رطوبت پایین‌تر است. با این حال، روش مایع‌سازی هیدروترمال می‌تواند با استفاده از لجن مرطوب برای بازده از روغن جلبک‌ها، هزینه‌های مرتبط با خشک کردن را کاهش دهد (Goyal et al. 2008). هضم بی‌هوازی (فرایند تبدیل بیوشیمیایی) متان و دی‌اکسید کربن تولید می‌کند (Cantrell et al. 2008). قندهای حاصل از نشاسته می‌توانند با استفاده از زیست‌توده جلبک‌ها تخمیر شده و اتانول تولید کنند (Ueno et al. 1998).

جدول ۱۰-۱. مزایا و معایب فرآیندهای تبدیل مشارکت‌کننده در تولید سوخت زیستی از ریزجلبک‌ها
(Juneja et al. 2013)

مزایا	معایب	فرآیند
حداکثر پتانسیل تولید روغن زیستی (تقریباً ۵۷/۵ درصد وزنی-وزنی برای پیرولیز سریع) (Miao and Wu 2004)	اساساً به زیست توده حاوی رطوبت کمتری نیاز است. بخشی با انرژی بالا برای خشک کردن مواد اولیه مورد نیاز است.	پیرولیز
مخلوط رطوبتی جلبک‌ها قابل استفاده شود. مصرف انرژی و هزینه را کاهش می‌دهد. پتانسیل تولید بالا (تقریباً ۶۰ درصد وزنی به وزن) دارد (Duan et al. 2013).	راکتورها ترکیبی و پرهزینه هستند.	مایع‌سازی ترموشیمیایی
می‌توان از فراورده‌های جانبی استفاده کرد. تبدیل قند به بیواتانول قابل اجرا است.	مدت زمان پردازش طولانی لازم است. زیست توده باید از قبل پردازش شود تا به قند تبدیل شود.	تخمیر
سوخت تجدیدپذیر به دست آمده ویژگی‌های فیزیکی بهتری دارد. بیودیزل موجود در بازار در ساده‌سازی فرایند تجاری مشارکت دارد.	تبدیل چربی در آن محدود است و بخش پروتئین و کربوهیدرات مواد اولیه به طور کامل بهره‌برداری نمی‌شود.	ترانس استریفیکاسیون

۱۰-۴ آماده‌سازی جلبک‌ها برای تولید بیودیزل

به طور کلی برخی از گونه‌های جلبک را می‌توان پس از آماده‌سازی قلیایی با استفاده از هیدروکسید سدیم برای تولید بیواتانول استفاده کرد (Harun et al. 2011). زیست توده جلبک پیش تصفیه شده با اسید سولفوریک، هیدرولیز نشاسته و الیگوساکاریدها را فراهم می‌کند و

می‌تواند اتانول تولید کند (Nguyen et al. 2009). گونه‌ی ریزجلبکی *کلامیدوموناس ریناردتی* از طریق فتوسنتز درصد بالایی از نشاسته را جمع‌آوری می‌کند. آنزیم‌های تجاری با استفاده از فرآیند هیدرولیز، نشاسته را به گلوکز تبدیل می‌کنند و تقریباً $23/5$ میلی گرم اتانول از هر گرم جرم خشک زیست توده جلبک‌ها به دست آمد (Choi et al. 2010). در یک گزارش تکمیلی، جلبک *کلرلا ولگاریس* پس از پیش تصفیه با محلول اسید، $0/4$ گرم اتانول بر هر گرم زیست توده تولید کرد (Lee et al. 2011). گونه جلبک *اسکیزوچیتریوم*^۱، پس از پردازش هیدروترمال، تقریباً $11/8$ گرم بیواتانول در هر لیتر از $25/7$ گرم گلوکز تولید کرد (Kim et al. 2012). دیکتیوکلروپسیس که یک ریزجلبک سبز است برای تولید بیودیزل گزارش شده است. کروماتوگرافی گازی مایع برای تعیین اسیدهای چرب آن انجام شد (Afify et al. 2010). گزارش شده است که گونه جلبک *اسپیرولینا*^۲ پس از ترانس استریفیکاسیون در درون سلول، بیودیزل تولید کرده است و جلبک *اسکیزوچیتریوم لیما سینوم*^۳ نیز پس از انجام روش ترانس استریفیکاسیون، بیودیزل تولید کرده است (Johnson and Wen 2009). سویه ی جلبک *استیکوکوکوس باسیلاریس*^۴ به عنوان یک سویه با توانایی بالا در تولید بیودیزل گزارش شده است (Olivieri et al. 2011).

۱۰-۵ استفاده از ریزجلبک‌ها برای تولید بیودیزل

اگر تمام سوخت حمل و نقل آمریکا به بیودیزل تبدیل شود، هزینه آن در سال به تقریباً $0/53$ میلیارد متر مکعب بر اساس نرخ هزینه فعلی خواهد بود (Chisti 2007; Fan and Burton 2009). به عبارت دیگر، تقاضای بیودیزل به حدی است که روغن‌های گیاهی، ذخیره صابون، روغن جاتروفا و باقی مانده روغن مصرف شده خوراکی قادر به تأمین آن نیستند. با استفاده از ریزجلبک‌ها برای تولید بیودیزل می‌توان وضعیت را به طور چشمگیری تغییر داد. ریزجلبک‌ها در یک سیستم به‌طور دقیق طراحی شده پرورش می‌یابند. این جلبک‌ها دسترسی قابل توجهی به دی‌اکسید کربن، مواد غذایی و آب دارند و قدرت فتوسنتزی بیشتری نسبت به گیاهان زراعی دارند (Vasudevan and Briggs 2008). ریزجلبک‌ها می‌توانند همراه با هیدروکربن‌ها، تعداد زیادی واسطه شیمیایی تولید کنند که قابلیت تبدیل به انواع مختلف سوخت مانند دیزل، الکل، هیدروژن و متان را دارند. گزارش شده است که گونه جلبک *کلروکوکم*^۵ به عنوان یک

1. *Schizochytrium* sp.

2. *Spirulina* sp.

3. *Schizochytrium limacinum*

4. *Stichococcus bacillaris*

5. *Chlorococum* specie

ماده مغذی مهم برای تولید بیواتانول شناخته شده است. اینها تنها موجودات دریایی هستند که توانایی بیولوژیکی بالا و توده زیستی بالا را دارند و همچنین قسمت قابل توجهی از روغن را دارا می‌باشند. و این موجودات دریایی را به عنوان یک منبع ارزشمند برای تولید بیودیزل بدون نیاز به رقابت با محصولات غذایی مطرح می‌سازد. جلبک‌ها قسمت بالایی از روغن را تولید می‌کنند، به عنوان مثال، در گونه جلبک بوتریوکوکوس براونی، این قسمت روغنی تا ۷۵ درصد از کل وزن خشک را تشکیل می‌دهد. اجزای اصلی روغن جلبک‌ها عموماً اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسید پالمیتیک همراه با میزان قابل توجهی از انواع بسیار غیراشباع هستند (Balat 2011; Chaker Ncibi and Sillanpaa 2013).

علاوه بر این، ریزجلبک‌ها بسیار سریع رشد می‌کنند و معمولاً زیست توده خود را در ۳۴ ساعت دو برابر می‌کنند. در طول رشد نمایی، این دوره را می‌توان به ۳/۵ ساعت کاهش داد. گزارش شده است که بهره وری زیست توده ریزجلبک‌ها ۵۰ برابر بیشتر از گیاه چمن است. ریزجلبک‌ها بهترین گیاه زراعی در حال رشد است (Demirbaş 2006; Fan and Burton 2009). وزارت انرژی (ایالات متحده آمریکا) از یک مطالعه گسترده در مورد تولید زیست توده ریز جلبک‌ها برای به دست آوردن بازده بیودیزل حمایت کرد (Sheehan et al. 1998). ریزجلبک‌ها معمولاً دارای مقدار قابل توجهی روغن هستند که بین ۲۰ تا ۵۰ درصد از وزن خشک آنها را تشکیل می‌دهد (Chisti 2007)، و برخی از جلبک‌های میکروبی حتی تا ۸۰ درصد از وزن خشک کل آنها را به صورت روغن تشکیل می‌دهند (Metting 1996; Spolaore et al. 2006).

در حال حاضر، تولید ریزجلبک در مقیاس بزرگ در حوضچه‌های روباز معمولاً در استخر مصنوعی کم عمق (Terry and Raymond 1985) و گاهی اوقات در فتوبیوراکتورهای لوله‌ای امکان‌پذیر است (Mirón et al. 1999; Grima et al. 1999). اگرچه حوضچه راه آهن هزینه‌های کمتری دارند، اما بازده زیست توده آنها کمتر از فتوبیوراکتورها است. معایب اصلی سیستم‌های روباز شامل از دست دادن آب به واسطه تبخیر با سرعتی مشابه در زمین و آلودگی به وسیله گونه‌های اضافی می‌باشد. این آلودگی سیستم‌های روباز به دلیل باز بودن در معرض محیط اتفاق می‌افتد (Schenk et al. 2008). فتوبیوراکتورها در مقابل حوضچه راه آهن، انرژی، آب و مواد شیمیایی کمتری استفاده می‌کنند. فتوبیوراکتورها می‌توانند یک محیط محدود را ایجاد کنند. این فتوبیوراکتورها می‌تواند بر اساس نیازهای دقیق ریزجلبک‌های موثر تنظیم شود تا تولید روغن سالانه قابل توجهی را به دست آورد (Chisti 2007). به همین دلیل، انتخاب سیستم‌های کشت محصول، انتخاب اصلی است که می‌تواند به طور قابل توجهی

بر مقرون به صرفه بودن و شایستگی روش تولید سوخت زیستی ریزجلبکی تأثیر بگذارد (Lee 2001; Janssen et al. 2003; Li et al. 2008; Fan and Burton 2009).

ریزجلبک‌ها به دلیل داشتن ویژگی‌های جذاب زیر، برای تولید بیودیزل مناسب هستند (Miyamoto 1997; Fan and Burton 2009):

- هزینه‌های مرتبط با برداشت و حمل و نقل ریزجلبک‌ها نسبت به منابع دیگر مانند برداشت سنتی زیست توده کمتر است.
- ریزجلبک‌ها قادر به انجام هر گونه تصفیه شیمیایی هستند.
- معمولاً می‌توان جلبک‌ها را در شرایط محیطی که برای برداشت سنتی نامناسب است، کشت کرد.
- ریزجلبک‌ها قادر به تثبیت دی‌اکسیدکربن در جو هستند. بنابراین آنها به کاهش سطح کربن دی‌اکسید در جو که یک مسئله جهانی پیوسته در حال افزایش است، کمک می‌کنند.

بسیاری از دانشگاه‌ها مانند دانشگاه یوتا پروژه‌های مربوط به تولید بیودیزل ریزجلبک‌ها را انجام داده‌اند و پروژه‌های زیادی برای تولید بیودیزل با استفاده از جلبک‌ها در دنیا در حال انجام است. برای مثال، گروه ویکتور اسمورگون و شرکت بین‌المللی پاور هیزل‌وود در حال انجام آزمایش در مقیاس کوچک به مدت ۶ ماه بر روی یک روش از شرکت فناوری سوخت سبز هستند، که از ریزجلبک‌ها در یک فتوبیوراکتور برای جذب CO₂ از گازهای موجود در کوره استفاده می‌کند. گروه ویکتور اسمورگون با استفاده از روغن کانولا^۱، روغن زیست توده جلبکی را به بیودیزل برای تولید بیودیزل تبدیل می‌کند. در یک طرح متفاوت، شرکت سولازیم در حال کار بر روی مهندسی ژنتیکی یک ریزجلبک سبز یوکاریوتیک (دونالیلا)^۲ به منظور بهبود عملکرد آن است. ریزجلبک دونالیلا قبلاً برای به دست آوردن بتاکاروتن استفاده می‌شد و می‌توانست مقدار قابل توجهی از چربیها را که برای تولید بیودیزل مناسب هستند، جمع آوری کند (Seefeldt 2007; Fan and Burton 2009).

در یک مطالعه انجام شده در گذشته، دو روش متفاوت استخراج CO₂ فوق بحرانی و مایع سازی ترموشیمیایی برای تولید بیودیزل با استخراج روغن از ریزجلبک‌ها مقایسه شد. نتایج

۱. روغن کانولا یا گیاه کلزا نوعی روغن گیاهی است. که از گونه ای از گیاه کلزا استخراج می‌شود.

نشان داد که مایع‌سازی ترموشیمیایی نسبت به استخراج دی‌اکسید کربن فوق بحرانی از نظر کمی مؤثرتر بود، اما تجزیه اسید چرب ممکن است در شرایط عملیاتی انجام شود. علاوه بر این، در تقریباً دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۹۵ درجه سانتی‌گراد، مقدار قابل توجهی از روغن استخراج شده به دست آمد. با وجود چشم‌انداز چشمگیر استفاده از میکروجلبک‌ها برای تولید بیودیزل، این امر هنوز بسیار فراتر از اجرای قطعی در سطح تجاری است (Aresta et al. 2005; Fan and Burton 2009). در گزارش قبلی، بیان شده است که چالش اصلی برای اجرای سطح تجاری آن، هزینه اصلی فوتو بیوراکتورها است (Vasudevan and Briggs 2008). به هر حال، چستی اظهار داشته است که تولید بیودیزل از میکروجلبک‌ها می‌تواند با ایجاد تغییرات در جلبک‌ها از طریق مهندسی متابولیک و ژنتیک به صورت مقرون به صرفه انجام شود (Chisti 2007). علاوه بر این، هزینه تولید بیودیزل جلبک‌ها را می‌توان با یکپارچه‌سازی ایده پالایشگاه زیستی و استفاده از مهندسی پیشرفته فوتوبیوراکتور، کاهش داد (Fan and Burton 2009).

۱۰-۶ روش‌های استفاده شده برای به دست آوردن بیودیزل از جلبک‌ها

اخیراً بسیاری از محققان مطالعات تولید بیودیزل را با استفاده از جلبک‌ها از روش‌های مختلف انجام داده‌اند. یکی از این روش‌ها، آگیری سلول‌های جلبک دست نخورده برای تولید زیست توده جلبک است. این روش فنی برای استخراج چربیهای طبیعی موجود در زیست توده جلبکی و استریفیکاسیون آنها با استفاده از یک کاتالیزور در حضور الکل استفاده می‌شود. این روش همچنین شامل جداسازی قسمت محلول در آب حاوی گلیسرین از قسمت نامحلول در آب حاوی استرهای سوختی است؛ سپس تقطیر استرهای سوختی تحت فشار و خلاء است. کل روش منجر به دریافت یک منبع مخلوط روغن جت از استرهای سوخت کوتاه و یک منبع مخلوط دیزل از استرهای سوخت بلند می‌شود (Kale et al. 2012; Chaker Ncibi and Sillanpaa 2013).

در یک تحقیق دیگر، تولید بیودیزل از جلبک‌ها با کشت جلبک‌های تولیدکننده روغن برای استخراج روغن جلبکی گزارش شده است که سپس به بیودیزل تبدیل شد. روغن جلبکی از جلبک‌های تولیدکننده روغن با پاره شدن بیولوژیکی و زیکول‌ها و دیواره سلولی جلبک‌ها با استفاده از گلیکول-پروتئیناز (یک سیستم آنزیمی هدفمند) مانند آنزیم‌ها یا یک ویروس یا ترکیبی از تمام این مواد زیستی استخراج شد (Oyler 2012; Chaker Ncibi and Sillanpaa 2013).

میکروارگانیزم‌ها همچنین می‌توانند مستقیماً به بیودیزل تبدیل شوند. به عنوان مثال، در یک

تحقیق، یک فرآیند یک مرحله‌ای برای تغییر مستقیم گونه جلبکی *نانوکلروپسیس سالینا*^۱ به بیودیزل با تحمل شرایط تولید اتانول با فشار بالا توسعه داده شد. اتانول به همین شکل در شرایط فشار بالا برای استخراج و ترانس استریفیکاسیون چربیهای جلبکی به منظور به دست آوردن استرهای متیل اسید چرب استفاده شد. این مطالعه منجر به به دست آوردن ۶۷ درصد بازده بهینه از اتیل استرهای اسید چرب در دمای ۲۶۵ درجه سانتیگراد پس از ۲۰ دقیقه زمان واکنش با نسبت ۱:۹ وزن به حجم جلبکهای خشک و اتانول شد (Chaker Ncibi and Sillanpaa 2013; Reddy et al. 2014).

۱۰-۷ تولید بیودیزل با استفاده از پسماند چربی حیوانی

تولید بیودیزل با استفاده از پسماند چربی حیوانی در حال حاضر رو به افزایش است. به دلیل استفاده زیاد از مرغ و گوشت، مقدار زیادی فرآوردههای جانبی حیوانی تولید می‌شود. حدود ۱۷ میلیون تن محصول فرعی در سال تنها در اتحادیه اروپا (Zalouk et al. 2009) از طریق کشتار گوشت گاو، گوسفند، خوک، مرغ و گاوهای شیری تولید می‌شود. نتایج پس از تفسیر نشان می‌دهد که تا ۱۲ میلیون تن را می‌توان پس از فرآوری در مناطق مرتبط با خوراک مواد غذایی به عنوان خوراکی طبقه بندی کرد (Toldrá et al. 2016)، در حالی که بقیه برای تولید انرژی برای تولید بیودیزل و سایر سوخت‌های زیستی استفاده می‌شوند (Rosson et al. 2020; Toldrá-Reig et al. 2020).

از نظر انرژی، به طور خاص تولید بیودیزل جذاب‌ترین است (Baladincz and Hancsók 2015). به این ترتیب استفاده از محصولات جانبی حیوانی غیرقابل خوردن، جذاب‌ترین استفاده را در تولید بیودیزل تضمین می‌کند. بیودیزل را هم می‌توان از پسماند چربی حیوانی و هم از روغن‌های گیاهی به دست آورد. تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی، فرآیندی پرهزینه است. بنابراین پسماند چربی حیوانی به عنوان جایگزینی برای تولید بیودیزل ترجیح داده می‌شود. علاوه بر این، بیودیزل تولید شده از پسماند چربی حیوانی، دارای ویژگی‌های روان‌کنندگی بهتری است و در مقایسه با دیزل فسیلی دارای عدد اکتان بالا است (Nigam and Singh 2011) و همچنین انتشار دی اکسید کربن را کاهش می‌دهد (Mansir et al. 2018). دی اکسید کربن رایج‌ترین گاز است و تا ۷۲ درصد در گازهای گلخانه‌ای نقش دارد (Toldrá-Reig et al. 2020).

در چند دهه گذشته، تولید بیودیزل با استفاده از پسماند چربی حیوانی به یک موضوع جذاب تبدیل شده است. به این منظور، تحقیقات زیادی برای تولید آن با استفاده از مواد اولیه با کیفیت پایین، بهبود کارایی بیوراکتورها برای انجام فرآیند ترانس استریفیکاسیون با امکان استفاده مجدد از کاتالیزورها انجام شده است (Lawan et al. 2020). در واقع، ۶۰ تا ۸۰ درصد از کل هزینه تولید بیودیزل بستگی به مواد خام در شکل چربی‌ها یا روغن‌هایی که در تولید بیودیزل استفاده می‌شود، دارد (Bušić et al. 2018). بنابراین انتخاب بهترین مواد بسیار مهم است زیرا آنها ممکن است تحت تأثیر آب و هوا، موقعیت جغرافیایی یا کشاورزی قرار می‌گیرند (Mahlia et al. 2020).

بسیاری از کشورها مانند اندونزی، ایالات متحده آمریکا، مالزی و برزیل و برخی کشورهای اروپایی از بیودیزل به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر و زیست تخریب پذیر استفاده می‌کنند (Balat and Balat 2010). در سال ۲۰۱۹ کل تولید بیودیزل جهان تقریباً ۳۵ تا ۴۵ میلیون تن بود و سالانه به طور مداوم در حال افزایش است (Flach et al. 2019). به عنوان بزرگترین تولیدکننده بیودیزل در جهان، اتحادیه اروپا با بیش از ۲۰۲ کارخانه و تولید بیش از ۱۴ میلیون تن در سال ۲۰۱۹ بود (Bockey 2019; Ramos et al. 2019) اما ظرفیت تولید بیودیزل آمریکا تا سال ۲۰۱۹ با استفاده از ۹۱ کارخانه ۸/۳ میلیون تن بود (Toldrá-Reig et al. 2020).

بیودیزل را می‌توان به راحتی در موتورهای دیزلی فعلی بدون تغییر خاصی استفاده کرد. در مقایسه با دیزل معمولی، بیودیزل نسبت کربن به هیدروژن ضعیف همراه با مقادیر اکسیژن بالا دارد که منجر به انتشار کمتر هیدروکربن‌ها، گوگرد و مونوکسیدها می‌شود (Bhatti et al. 2008; Xue et al. 2011). استفاده از پسماند چربی حیوانی به جای روغن‌های گیاهی، راهی برای تولید بیودیزل مقرون به صرفه و پایدار است (Gumahin et al. 2019).

تحقیقات نشان داده است که هر سال تعداد زیادی حیوان ذبح می‌شوند. ذبح حیوانات منجر به تولید مقدار قابل توجهی پسماند همراه با چربی می‌شود. این پسماندها نیاز به تصفیه یا بازیافت مناسب دارند تا به تولید محصولات ارزشمند منجر شوند و آلودگی را کاهش دهند (Mora et al. 2019, 2020).

این چربی‌ها شامل چربی گاو، چربی گوسفند، چربی خوک و چربی مرغ هستند که به ترتیب از بافت‌های چربی بیرون آمده از گاو، گوسفند، خوک و خون آنها به دست می‌آیند

(Sai Akhil and Alagumalai 2019; Barik and Vijayaraghavan 2020). فرآیند تولید چربی با استفاده از روش استخراج رطوبتی انجام می‌شود. در این روش، چربی‌ها از پروتئین جدا می‌شوند. چربی‌های دیگر از صنایع فرآوری گوشت و با بازیافت پسماند صنعتی آشپزی به دست می‌آیند. چربی‌های بازیافتی که از گرمایش چربی‌های حیوانی استخراج می‌شوند و در پخت و پز صنعتی و تجاری استفاده شده‌اند، می‌توانند بر اساس مقادیر اسیدهای چرب آزاد، به گریس‌های قهوه‌ای و زرد تقسیم شوند (Banković-Ilić et al. 2014). ترکیب اسیدهای چرب در چربی گاو، چربی مرغ، چربی گوسفند و چربی خوک در جدول ۱۰-۲ آمده است.

جدول ۱۰-۲. ترکیب اسیدهای چرب در چربی گاو، چربی مرغ، چربی گوسفند و چربی خوک (Toldrá-Reig et al. 2020)

چربی طيور	چربی گوشت گوسفند	چربی گاو	چربی گوشت خوک	اسیدهای چرب
(Zduńczyk et al. 2011)	(Castro et al. 2005)	(Realini et al. 2004)	(Toldrá et al. 2004)	
۰/۴	۲/۲	۱/۶	۱/۶	اسید میریستیک
۲۱/۶	۲۱/۱	۲۱/۶	۲۵/۱	اسید پالمیتیک
۰/۳	-	-	۰/۲	اسید ایکوساپنتانویک
۶/۳	۱۱/۶	۱۷/۷	۱۲/۶	اسید استئاریک
۳/۴	-	-	۰/۳	اسید آراشیدونیک
۳۰/۰	۳۸/۷	۳۱/۵	۳۶/۵	اسید اولئیک
۲/۴	۰/۶	۱/۳	۱/۱	اسید لینولنیک
۲۸/۴	۱۰/۲	۳/۳	۱۶/۵	اسید لینولئیک
۳/۲	۲/۱	۲/۵	۲/۸	اسید پالمیتولئیک
۲۹/۱	۴۰/۴	۴۹/۱	۳۹/۴	کل اسیدهای چرب اشباع شده
۳۳/۲	۴۷/۱	۴۱/۰	۳۹/۷	کل اسیدهای چرب تک اشباع نشده
۳۷/۶	۱۲/۵	۱۰/۰	۲۰/۹	حلقه‌های اسیدهای چرب اشباع نشده

به دلیل درصد قابل توجهی اسیدهای چرب اشباع شده، چربی خوک و چربی‌های دامی به صورت جامد است، در حالی که چربی مرغ تقریباً به صورت مایع است (Öner and Altun 2009). بنابراین می‌توان بیان کرد که برای استفاده از چربی‌های جامد حیوانات برای در تولید بیودیزل، حرارت مقدماتی در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد ضروری است (Cernat et al. 2019). با

بیودیزل عمدتاً از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون چربی‌ها با الکل زنجیره کوتاه به همراه یک کاتالیزور تولید می‌شود. کاتالیزورهای زیادی در تولید بیودیزل مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از کاتالیزورهای سنتی در جدول ۱۰-۳ بیان شده است. اگر از کاتالیزور قلیایی در فرآیند ترانس استریفیکاسیون چربی حیوانی استفاده شود، فرآیند به سرعت بسیار بالا انجام خواهد شد. سرعت واکنش با کاتالیزور قلیایی حدود ۴۰۰۰ برابر بیشتر از زمانی است که از کاتالیزور اسیدی استفاده می‌شود (Dias et al. 2009; Kirubakaran and Selvan 2018; Thangaraj et al. 2019).

جدول ۱۰-۳. برخی از کاتالیزورهای سنتی مورد استفاده برای تولید بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون (Ma and Hanna 1999)

ردیف	کاتالیزورها	انواع
۱	قلیایی	متوکسید سدیم، هیدروکسید سدیم، سدیم آمید، پتاسیم هیدروکسید، هیدرید پتاسیم، پتاسیم آمید، و متوکسید پتاسیم
۲	اسیدی	اسید سولفونیک آلی، اسید سولفوریک، اسید فسفریک، و اسید هیدروکلریک
۳	کاتالیزورهای ناهمگن	مانند آنزیم لیپازها
۴	کاتالیزورهای پیچیده	زیرکونیوم، نانو کاتالیست‌ها، و سیلیکات‌ها

متوکسیدها نیز می‌توانند عملکرد خوبی داشته باشند، اما از نظر اقتصادی مناسب نیستند (Atabani et al. 2012). استفاده از کاتالیزور اسیدی می‌تواند سرعت واکنش را کاهش دهد و به یک راکتور بزرگ نیاز دارد که می‌تواند باعث خوردگی شود (Canakci and Sanli 2008). کاتالیزوری که بیشتر استفاده می‌شود، متانول است. زیرا هزینه‌ای کمتر دارد (Ramadhas et al. 2005). در تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی، فرآیند ترانس استریفیکاسیون با استفاده از کاتالیزور قلیایی اولویت دارد. زیرا فناوری استفاده از آنزیم و کاتالیزورهای غیرهمگن هنوز توسط تولیدکنندگان بیودیزل به‌طور گسترده به‌کار نرفته است (Kristi et al. 2018).

تری‌گلیسریدها اساساً از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون با آزاد کردن یک مولکول اسید چرب به دی‌گلیسرید تبدیل می‌شوند. دی‌گلیسریدها بعداً با آزاد کردن یک مولکول اسید چرب دیگر به مونوگلیسریدها تبدیل می‌شوند و در نهایت مونوگلیسریدها با آزاد کردن یک مولکول اسید چرب دیگر به گلیسرول تبدیل می‌شوند (Van Gerpen 2005).

بعد از آماده‌سازی، راندمان واکنش به عواملی مانند دما، زمان، ترکیب اسیدهای چرب، مقدار کاتالیزور و سایر متغیرهایی که در جدول ۱۰-۴ ذکر شده است، بستگی دارد. حداکثر نسبت الکل به روغن برای تولید قابل توجه بیودیزل ۱:۶ گزارش شده است در حالی که هر افزایش یا کاهش از این نسبت می‌تواند روند جداسازی گلیسرول را به تأخیر بیندازد (Musa 2016).

اگر از ماده قلیایی به عنوان کاتالیزور استفاده شود، به دلیل تشکیل صابون حاصل از اسیدهای چرب آزاد و کاتالیزور، کاهش تولید بیودیزل را می‌توان تجربه کرد (Li et al. 2020; Talebian-Kiakalaieh et al. 2013). نتایج و عواقب استفاده از کاتالیزور قلیایی منجر به از دست دادن محصول استر و کاتالیزور با هزینه‌ی چشمگیر و تولید کمتر بیودیزل با تصفیه دشوار می‌شود (Lotero et al. 2005; Vicente et al. 2004; Anitha and Dawn 2010). مقادیر اسیدهای چرب آزاد در محدوده ۵ تا ۳۰ درصد نیاز به آماده‌سازی دارد (Mora et al. 2020). برای فرآیند ترانس استریفیکاسیون موثر، مقادیر اسیدهای چرب آزاد را می‌توان تا ۱/۵-۱/۰ درصد پیشنهاد کرد (El-Mashad et al. 2008). برای کاهش بخش اسیدهای چرب آزاد، می‌توان مواد اولیه را در دمای بالا استریفیکاسیون کرد (Encinar et al. 2011) یا از فرآیندهای خنثی‌سازی و جدا سازی استفاده کرد (Lee et al. 2002). بنابراین آماده‌سازی جهت از بین بردن اسیدهای چرب آزاد و آب اضافی قبل از فرآیند ترانس استریفیکاسیون ضروری است. برخی از این آماده‌سازی‌ها شامل خشک کردن با حرارت، استفاده از کلرید کلسیم و ژل سیلیکا، و در صورت لزوم استفاده از سولفات سدیم بی‌آب برای کاهش رطوبت می‌باشد (Toldrá-Reig et al. 2020). در نهایت مواد معلق را می‌توان از طریق فیلتراسیون مکشی یا از فیلترهای سلولزی حذف کرد (Felizardo et al. 2006; Predojević 2008; Toldrá-Reig et al. 2020).

۹-۱۰ ویژگی‌های بیودیزل حاصل از مواد اولیه حیوانی

انجمن مواد و آزمون آمریکا^۱ و کمیته استاندارد اروپا^۲ برخی از سیاست‌ها را برای ویژگی‌های بیودیزل تعیین کرده است. بسیاری از مزایای بیودیزل تولید شده از چربی‌های حیوانی مانند کاهش ۷۵ تا ۹۰ درصدی انتشار هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای وجود دارد (Carraretto et al. 2004; Mahlia et al. 2020). همچنین، انتشار دی اکسید گوگرد و مونوکسید کربن کاهش می‌یابد (Shaghghi et al. 2020).

1. The American society for testing Materials (ASTM)
2. European Committee of Standardization (CEN)

جدول ۱۰-۴. شرایط عملیاتی مختلف برای تولید بیودیزل از طریق پسماند چربی حیوانی حاصل از ترانس استریفیکاسیون (Toldrá-Reig et al. 2020)

چربی های حیوانی	کاتالیزور	درصد بازده واکنش (درصد)	وزن چربی (درصد)	شرایط عملیاتی	نسبت الکل به روغن	منابع
چربی گاو	پتاسیم هیدروکسید	۹۰/۸	۰/۸	۶۰ درجه سانتی گراد، ۲ ساعت	۶:۱	Mata et al. (2014)
چربی گوشت خوک	پتاسیم هیدروکسید	۹۱/۴	۰/۸	۶۰ درجه سانتی گراد، ۲ ساعت	۶:۱	Mata et al. (2014)
چربی طیور	پتاسیم هیدروکسید	۷۶/۸	۰/۸	۶۰ درجه سانتی گراد، ۲ ساعت	۶:۱	Mata et al. (2010)
چربی گربه ماهی	پتاسیم هیدروکسید	۹۲/۷	۰/۸	۵۰ درجه سانتی گراد، ۰/۷۵ ساعت	۶:۱	Huong et al. (2011)
چربی گوشت خوک ^۱	پتاسیم هیدروکسید	۹۷/۳	۰/۵	۶۵ درجه سانتی گراد، ۲ ساعت	۶:۱	Encinar et al. (2011)
چربی اردک	پتاسیم هیدروکسید	۹۷/۱	۱	۶۵ درجه سانتی گراد، ۳ ساعت	۳:۱	Chung et al. (2009)
ضایعات مرغ	پتاسیم هیدروکسید	-	۱	۶۰ درجه سانتی گراد، ۲ ساعت	۶:۱	Lin and Tsai (2015)
چربی های حیوانی	لیپاز غیرفعال از کاندیدا آنتارکتیکا	۷۹	۱۰	۴۰ درجه سانتی گراد، ۶ ساعت	۵۰:۶	Pollardo et al. (2018)
چربی گاو	لیپاز غیرفعال از بورکهلدریا سیپاسیا	۸۹/۷	۲۰	۵۰ درجه سانتی گراد، ۴۸ ساعت	۱۲:۱	Da Rós et al. (2010)
چربی گوشت گوسفند	منیزیم اکسید-پتاسیم هیدروکسید	۹۸/۰	۲۰	۶۵ درجه سانتی گراد، ۲۰ دقیقه	۲۲:۱	Mutreja et al. (2011)
چربی خوک ^۲	پتاسیم هیدروکسید	۹۸/۰	۱/۱	۶۵ درجه سانتی گراد، ۳ ساعت	۷/۴:۱	He et al. (2020)
چربی مرغ	پتاسیم هیدروکسید	۸۲/۰	۰/۸	۶۰ درجه سانتی گراد، ۱ ساعت	۸:۱	Chavan et al. (2017)

۱. این چربی معمولاً از قسمت های چرب گوشت خوک مانند چربی سینه یا چربی شکم جدا می شود و برای استفاده در آشپزی و تهیه غذاها به کار می رود.

۲. این عبارت معمولاً در زمینه علمی و تخصصی برای اشاره به چربی حاصل از خوک ها استفاده می شود. از لحاظ معنایی با عبارت "Pork fat" هم معنی است.

چربی‌های حیوانی	کاتالیزور	درصد بازده واکنش (درصد)	وزن چربی (درصد)	شرایط عملیاتی	نسبت الکل به روغن	منابع
چربی گوسفندی	اسید سولفوریک	۹۳/۲	۱/۲۵	۶۰ درجه سانتی گراد، ۲۴ ساعت	۱:۳۰	Bhatti et al. (2008)
چربی مرغ	NaOMe	۸۸/۵	۱	۶۰ درجه سانتی گراد، ۴ ساعت	۶:۱	Alptekin and Canakci (2011)
چربی مرغ	نانوذرات کلسیم اکسید	۸۸/۵	۱	۶۰ درجه سانتی گراد، ۵ ساعت	۹:۱	Keihani et al. (2018)
چربی مرغ	غشای ترکیبی و NaOMe	۹۸/۱	۱	۷۰ درجه سانتی گراد، ۳ ساعت	۱:۱	Shi et al. (2013)
چربی مرغ	کلسیم اکسید/فریت مس	۹۴/۵	۳	۷۰ درجه سانتی گراد، ۴ ساعت	۱۵:۱	Seffati et al. (2019)
چربی مرغ	اسید سولفوریک	۹۹/۰	۱/۲۵	۵۰ درجه سانتی گراد، ۲۴ ساعت	۱:۳۰	Bhatti et al. (2008)
چربی خوک ^۱	۳۵ درصد کلسیم اکسید/زئولیت	۹۰/۹	۸	۶۵ درجه سانتی گراد، ۱/۲۵ ساعت	۳۰:۱	Lawan et al. (2020)
چربی مرغ	AC/CuFe2O4 محصور شده با کلسیم اکسید	۹۵/۶	۳	۶۵ درجه سانتی گراد، ۴ ساعت	۱۲:۱	Seffati et al. (2020)
چربی قهوه‌ای	ZnO/ZrO2	۷۸/۰	۰/۸	۲۰۰ درجه سانتی گراد، ۲ ساعت	۱:۱/۵	Kim et al. (2011)
چربی خوک	متانول با فشار و دمای بالا	۸۹/۹	-	۳۳۵ درجه سانتی گراد، ۲۰ مگاپاسکال، ۱۵ دقیقه اختلاط در سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه	۴۵:۱	Shin et al. (2012)
چربی خوک	لیپاز از گونه مخمر کاندیدا	۸۷/۴	۲۰	۴۰ درجه سانتی گراد، ۳۰ ساعت	۳:۱	Lu et al. (2007)
چربی خوک	لیپاز از کاندیدا آنتارکتیکا	۷۴	۱۰	۳۰ درجه سانتی گراد، ۷۲ ساعت	۱:۱	Lee et al. (2002)

۱. به چربی اشاره می‌کند که از گوشت خوک به دست می‌آید. این عبارت عموماً در زمینه آشپزی و غذایزی استفاده می‌شود و به چربی اشاره می‌کند که برای تهیه غذاها و شیرینی‌پزی استفاده می‌شود.

عدد ستان بیودیزل نشانگر خاصیت اشتعال بیودیزل است، به طوری که کیفیت بهبود یافته اشتعال می‌تواند با عدد ستان بالا مرتبط باشد (Atabani et al. 2012). بیودیزل به‌دست‌آمده از چربی‌های حیوانی، به دلیل وجود حداکثر چربی‌های اشباع و اکسیژن بالا، دارای عدد ستان بیشتری نسبت به روغن‌های گیاهی است (Cernat et al. 2019). درصد گلیسرین آزاد در بیودیزل نشان‌دهنده غلظت گلیسرول باقی‌مانده در محصول نهایی بیودیزل است. اگر درصد گلیسرین آزاد بالا باشد، ممکن است تزریق سوخت آسیب ببیند (Atabani et al. 2012). برخی از خواص اصلی بیودیزل به دست آمده از پسماند چربی حیوانی در جدول ۱۰-۵ ارائه شده است. هزینه‌های بیودیزل حاصل از پسماندهای چربی حیوانات وابسته به هزینه مواد اولیه، نسبت اسیدهای چرب آزاد، پیش‌پردازش انجام شده، شرایط عملیاتی و تصفیه بیودیزل است (Rezania et al. 2019). بیودیزل به‌دست‌آمده از روغن‌های گیاهی در مقایسه با بیودیزل تولید شده از پسماند چربی حیوانی به‌دلیل تولید مقدار زیادی گلیسرین از چربی‌های حیوانی، به راحتی قابل خالص‌سازی است. این گلیسرین در طول فرآیند ترانس استریفیکاسیون تولید می‌شود و می‌تواند دوام موتور را تحت تاثیر قرار دهد، به همین دلیل حذف آن ضروری است (Sander et al. 2018). هنگام تولید ۱۰ کیلوگرم بیودیزل، تقریباً ۱ کیلوگرم گلیسرول به دست می‌آید (Atadashi et al. 2010).

مقدار گلیسرین که به دلیل تولید جهانی آن از بین می‌رود کم است، اما می‌توان آن را در صنایع داروسازی، به عنوان افزودنی سوخت و در بیوپلیمرهای مراقبت شخصی استفاده کرد (Faba et al. 2015; Rezania et al. 2019).

در شرایط کنونی پیشرفت‌های زیادی در بهبود تولید بیودیزل با استفاده از پسماند چربی حیوانی تجربه می‌شود. چین در صدر لیست کشورهای قرار دارد که بیشترین تعداد اختراعات مرتبط با بیودیزل را دارند. در ایالات متحده آمریکا، بیش از ۵۰ درصد از اختراعات بر روی روش‌های فنی پردازش، فناوری راکتورها و روش‌های فنی پیش‌پردازش تمرکز دارند (Mahlia et al. 2020). ابزارهای مختلفی در فرآیند ترانس استریفیکاسیون برای توسعه فرآیندهایی مانند اولتراسونیک و مایکروویو به منظور افزایش اختلاط روغن و متانول ایجاد شده‌اند که باعث افزایش بازده ترانس استریفیکاسیون می‌شود و در نتیجه منجر به بهبود قابل توجه تولید بیودیزل می‌شود (Shin et al. 2012; Stavarache et al. 2007).

جدول ۱۰-۵. ویژگی‌های بیودیزل تولید شده از پسماند چربی حیوانی (Toldrá-Reig et al. 2020)

ویژگی	محدودیت‌ها	چربی گوشت خوک	چربی طیور	چربی گاو	چربی گاو	چربی مرغ	چربی مرغ	چربی گوسفندی
		Encinar et al. (2011)	Mata et al. (2010)	Atabani et al. (2012)	Mata et al. (2010)	Barik and Vijayaraghavan (2020)	Alptekin and Canakci (2011)	Bhatti et al. (2008)
چگالی در ۱۵ درجه سانتیگراد (کیلوگرم بر متر مکعب)	۸۶۰-۹۰۰	۸۷۰	۸۷۷	-	۸۷۰	۸۳۰	۸۸۳	۸۵۶
مقدار اسید (میلی گرم هیدروکسید پتاسیم بر گرم)	کمتر از ۰/۵۰	۰/۲۳	۰/۵۵	۰/۱۴۷	۰/۲۰	-	۰/۲۲	۰/۶۵
عدد ستان	بیشتر از ۵۱/۰	۵۶/۹	-	-	-	۵۰	-	۵۹/۰
مقدار ید (گرم در ۱۰۰ گرم)	کمتر از ۱۲۰	۶۶/۷	۷۸/۸	-	۴۴/۴	-	-	۱۲۶
ویسکوزیته در ۴۰ درجه سانتیگراد (میلی‌متر مربع بر ثانیه)	۳/۵۰-۵/۰۰	۴/۷۴	۶/۸۶	۴/۸۲	۵/۳۵	۳/۵	۴/۹۴	-
نقطه اشتعال (درجه سانتیگراد)	بزرگتر از ۱۲۰	۱۷۵	۱۷۲	بزرگتر از ۱۶۰	۱۷۱	۵۰	۱۷۱/۸	-
میزان مقادیر آب (میلی گرم بر کیلوگرم)		۵۰۰	۱۲۰۱		۳۷۴		۲۰۰	۲۰۰
گلیسرین آزاد (درصد)	-	-	-	۰/۰۰۸	-	-	۰/۱۹	-
نقطه ریزش ^۱ (درجه سانتیگراد)	-	-	-	-	۱۰	-۶	-۶	-۵
نقطه گرفتگی (فیلتر در سرما (درجه سانتیگراد)	۸	۵ تا ۲۰	۳	۱۴	۱۰	-	-	-

۱. نقطه ریزش یک مایع پایین‌ترین دمایی است که در آن مایع تحت شرایط تعیین شده روان و جاری می‌گردد. نقطه ریزش نشانگر پایین‌ترین دمایی است که در آن روغن به سهولت قابل پمپ کردن باشد.

اخیراً مطالعاتی انجام شده است که نشان می‌دهد برخی جاذب‌ها مانند هیدروکسید کربن آلومینیوم منیزیم، و ۵-۳-دی‌ترت-بوتیل ۱-۴-هیدروکسی بنزین می‌توانند به طور قابل توجهی برای کند کردن تجزیه افزایش بهبود سازگار با محیط زیستی اکسیداتیو بیودیزل و ترکیبات آن استفاده شوند. مقدار اسید را می‌توان تا ۹ درصد کاهش داد. بنابراین این جاذب‌ها می‌توانند با تثبیت رادیکال‌های آزاد و متوقف کردن شروع زنجیره اکسیداسیون جدید، عملکرد و کیفیت بیودیزل را در برابر تجزیه و تغییرات غیرمطلوب حفظ کنند (Kpan and Krahl 2019).

بیودیزل به‌دست‌آمده از روغن‌های گیاهی دارای مقداری رسوب استریل گلوکزید است. این رسوب باعث مسدود شدن فیلتر می‌شود. این وضعیت را می‌توان با حذف این رسوبات از طریق جذب با استفاده از سیلیس ۳ درصد در دمای ۱۱۲ درجه سانتیگراد و به مدت ۷۲ دقیقه بهبود بخشید (Saeong et al. 2017). تصاویر برخی از ثبت اختراعات مربوط به تولید بیودیزل دقیقاً در جدول ۱۰-۶ آورده شده است.

۱۰-۱۰ چالش‌های اصلی و چشم‌اندازهای آینده در تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی و پسماند چربی حیوانی

مسئله اصلی که در سراسر جهان با آن روبرو هستیم، تقاضای انرژی است. تمام توسعه‌های جهانی، اقتصادی و اجتماعی به انرژی نیاز دارند. تاکنون، تقاضای اصلی جهانی در زمینه انرژی از طریق سوخت‌های نفتی تأمین می‌شود. تا سال ۲۰۴۰، پیش‌بینی می‌شود که تقاضای جهانی انرژی تا ۳۷ درصد افزایش یابد (Joshi et al. 2017). کاهش و محدودیت منابع محققان را به سمت یافتن منابع جایگزین و قابل تجدیدپذیر برای برآورده کردن تقاضای انرژی سوق می‌دهد. برای این منظور روش‌ها و فناوری‌های زیادی در حال انجام است (Tomes et al. 2010; Kour et al. 2019). سوخت‌های زیستی نوعی سوخت هستند که از منابع تجدیدپذیر مانند زیست توده لیگنوسلولزی استفاده می‌کنند و می‌توانند تقاضای انرژی جهان را تأمین کنند. این سوخت‌های زیستی را می‌توان با استفاده از منابع شیمیایی به‌دست‌آمده از وسایل بیولوژیکی یا با استفاده از ارگانسیم‌های موجود مانند ریزجلبک‌ها و باکتری‌ها تولید کرد (Rodionova et al. 2017). در چند دهه گذشته، زیست توده گیاهی به طور گسترده‌ای برای تولید سوخت زیستی استفاده می‌شد، اما از سال‌های اخیر، زیست توده جلبکی جایگزین آن شده و خود را به عنوان یک منبع زیستی نوآورانه برای تولید سوخت زیستی اثبات کرده است (Dragone et al. 2010).

جدول ۱۰-۶. برخی از ثبت اختراع‌های انتخاب شده برای تولید بیودیزل با استفاده از پسماند چربی حیوانی (Toldrá-Reig et al. 2020)

منابع	ویژگی‌های بیودیزل	شرایط ویژه	کاتالیزور	مواد خوراکی حیوانی
Herskowirz et al. (2006), Herskowitz (2008) and Helwani et al. (2009a, b)	مخلوطی از پارافین‌های C14 تا C18 با نسبت ایزو به پارافین‌های معمولی به اندازه ۲ به ۸؛ سولفور کمتر از ۵ ppm و لغزندگی قابل قبول	هیدروداکسیژناسیون و هیدروایزومریزاسیون روغن در یک مرحله مجزا	پلاتین و پالادیوم به همراه یک عنصر اسیدی	روغن چربی خوک، روغن ماهی، روغن چربی حیوانی
Hoff et al. (2012)	تقسیم بندی بیودیزل خام و گلیسرول خام حاصل از محیط واکنش دوم با استفاده از یک سیستم فیلتراسیون با جریان متقاطع چهارگانه	آب اضافی توسط صافی با جریان متقاطع حذف می‌شود	آنزیم لیپاز غیرفعال	روغن حیوانی، چربی خوک، روغن ماهی، چربی گوشت، چربی‌های پخته شده ^۱
Lavella et al. (2014)	امکان استفاده از مجموعه‌ای از مواد اولیه، در آغاز به کار با ترکیب حرارتی به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی	حذف چربی‌های سطحی؛ تمیز کردن فیزیکی (اعمال گرما و ایجاد فشار کم)؛ و گلیسرولیز	ZnO, H2SO4	چربی‌های حیوانی
Scott (2014, 2017)	مقدار اسیدهای چرب آزاد در مخلوط به کمتر از ۳ درصد از وزن کاهش می‌یابد	فرآیند استریفیکاسیون در دو مرحله	اسید سولفوریک ۹۶ درصد	چربی‌های حیوانی که شامل ۲۰-۱۰ درصد اسیدهای چرب آزاد است.
Matsumura (2015)	تقطیر برای حذف محصولات جانبی مانند گلیسرول و الکل	واکنش استرسازی اسیدهای چرب آزاد در صورتی که بیشتر از یک مقدار تعیین شده باشد.	KOH	چربی‌های حیوانی
Matsumura (2015)	کاهش هزینه‌ها از طریق تولید گلیسرین و مشتقات گلیسرین با عملکرد و خلوص بالا	ترانس استریفیکاسیون با مقادیر الکل کمتر	KOH	روغن گوشت گاو، روغن گوشت خوک، چربی‌های حیوانی مانند روغن ماهی

۱. به چربی‌هایی اشاره دارد که از فرآیند پخت و برداشت چربی از باقیمانده حیوانات، مانند گاو، گوسفند یا خوک، به دست می‌آیند. این چربی‌ها ممکن است در غذاپزی، تهیه محصولات قنادی و در بسیاری از صنایع دیگر استفاده شوند.

پیشرفت‌های زیادی در تولید سوخت زیستی با استفاده از ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها وجود دارد (Demirbas 2009; Heimann 2016; Rodionova et al. 2017). ریزجلبک‌ها به دلیل بهره‌وری بالا در مقایسه با سایر منابع زیستی، منبع قابل توجهی برای تولید بیودیزل هستند (Scott et al. 2010).

با وجود تمامی سودهای این صنعت، برای تولید تجاری بیودیزل در مقیاس گسترده، چالش‌های اساسی وجود دارد. این چالش‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی در تولید بیودیزل برای تامین تقاضای انرژی در حوزه حمل و نقل مؤثر باشد. اولین و مهم‌ترین چالش رشد جلبک‌ها است. رشد جلبک‌ها می‌تواند با استفاده از بیوراکتورهای باز که به راحتی قابل تنظیم هستند، انجام شود. اما مرحله کلیدی حذف آلاینده‌ها توسط ارگانوسم‌های اضافه شده است. علاوه بر این، دی‌اکسید کربن و تأمین مواد غذایی در محیط کشت نیز عامل کلیدی است. شرط اصلی در تولید روغن برای فرآیند بیودیزل، وجود جزئیات سلولی بیشتر مانند DNA و کلروفیل است و همچنین باید بدون هیچ گونه آلودگی اساسی باشد (Scott et al. 2010). برخی از پیش‌پردازش‌ها مانند شیمیایی، بیولوژیکی، فیزیکی و فیزیکوشیمیایی برای بهبود دسترسی آنزیم به سلولز با حذف لیگنین، همی سلولز و سلولز مورد نیاز است و در نهایت ممکن است ساکارازی کردن و تخمیر انجام شود (Wang et al. 2018). معایب اصلی پیش‌پردازش‌ها، تولید تعداد کمی مهارکننده برای میکروب‌ها است. این مهارکننده‌ها ممکن است شامل اسید لووولینیک، اسید فورمیک، اسیدهای ایفاتیک و اسید استیک باشد (Zhang et al. 2016). حضور اسید استیک در محیط کشت می‌تواند منجر به کاهش بازده زیست توده و سرعت رشد مخمر ساکارومایسس سرویزیه شود. اخیراً تعدادی روش‌ها برای افزایش تحمل میکروب‌ها به مهارکننده‌ها انجام شده است. این روش‌ها انتخاب ژن‌هایی هستند که می‌توانند برای تحمل استرس و مهندسی متابولیک و ژنتیک برای افزایش تحمل مورد استفاده قرار گیرند (Wang et al. 2018). در حال حاضر، رقابت سوخت زیستی با سوخت فسیلی در سطح تجاری تقریباً غیرممکن و بسیار چالش‌برانگیز است. اما با توسعه سویه‌های نوآورانه با قابلیت تجاری، می‌توان وضعیت را تغییر داد. این سویه‌ها می‌توانند با ترکیب چندین روش مهندسی ژنتیکی توسعه یابند تا بتوان به حداکثر تولید سوخت زیستی دست یافت (Rodionova et al. 2017). برای دستیابی به اقتصاد سوخت زیستی سازگار با محیط زیست در آینده، درک این مفهوم ضروری است که تغییرات محیطی آینده چگونه بر تولید سوخت زیستی تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، سوخت‌های زیستی به عنوان یک منبع سازگار با محیط زیست ظاهر شده‌اند. این سوخت‌ها جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی هستند؛ همچنین غلظت آلاینده‌های خودرو را کاهش می‌دهد.

۱۱-۱۰ نتیجه‌گیری

بیودیزل‌های حاصل از منابع جلبک‌ها و پسماندهای چربی حیوانی به دلیل خاصیت قابل تجزیه، سازگار با محیط زیست، تجدیدپذیر و بدون گوگرد، در سراسر جهان در حال گسترش هستند. هزینه بیودیزل معمولاً به هزینه مواد اولیه بستگی دارد. به طور کلی برخی از گونه‌های جلبک می‌توانند برای تولید بیودیزل پس از پیش تصفیه قلیایی آنها از طریق هیدروکسید سدیم مورد استفاده قرار گیرند. مواد اولیه پسماند چربی حیوانی منجر به سوخت بیودیزل ارزان‌تر در مقایسه با سوخت تولید شده از روغن گیاهی می‌شود. پسماند چربی حیوانی را می‌توان از پسماند کشتارگاه‌ها به دست آورد و بیشتر به عنوان ماده اولیه در تولید بیودیزل استفاده کرد. تولید بیودیزل می‌تواند از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون انجام شود. به منظور پیش تصفیه، کاتالیز قلیایی بر کاتالیز اسیدی در تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی به دلیل سرعت بیشتر و کارایی اقتصادی آن ترجیح داده می‌شود.

منابع

- Abbaszaadeh A, Ghobadian B, Omidkhah MR, Najafi G (2012) Current biodiesel production technologies: a comparative review. *Energ Convers Manage* 63:138–148
- Afify AEMM, Shalaby EA, Shanab SM (2010) Enhancement of biodiesel production from different species of algae. *Grasas Aceites* 61(4):416–422
- Alptekin E, Canakci M (2011) Optimization of transesterification for methyl ester production from chicken fat. *Fuel* 90(8):2630–2638
- Anitha A, Dawn SS (2010) Performance characteristics of biodiesel produced from waste groundnut oil using supported heteropolyacids. *Int J Chem Eng Appl* 1(3):261
- Aransiola EF, Ojumu TV, Oyekola OO, Madzimbamuto TF, Ikhu-Omogbe DIO (2014) A review of current technology for biodiesel production: state of the art. *Biomass Bioenergy* 61:276–297
- Aresta M, Dibenedetto A, Carone M, Colonna T, Fragale C (2005) Production of biodiesel from macroalgae by supercritical CO₂ extraction and thermochemical liquefaction. *Environ Chem Lett* 3(3):136–139
- Atabani AE, Silitonga AS, Badruddin IA, Mahlia TMI, Masjuki HH, Mekhilef S (2012) A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renew Sustain Energy Rev* 16(4):2070–2093
- Atadashi IM, Aroua MK, Aziz AA (2010) High quality biodiesel and its diesel engine application: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 14(7):1999–2008
- Baladincz P, Hancsók J (2015) Fuel from waste animal fats. *Chem Eng J* 282:152–160
- Balat M (2011) Potential alternatives to edible oils for biodiesel production—a review of current work. *Energ Convers Manage* 52(2):1479–1492
- Balat M, Balat H (2010) Progress in biodiesel processing. *Appl Energy* 87(6):1815–1835

- Banković-Ilić IB, Stamenković OS, Veljković VB (2012) Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renew Sustain Energy Rev* 16(6):3621–3647
- Banković-Ilić IB, Stojković IJ, Stamenković OS, Veljković VB, Hung YT (2014) Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production. *Renew Sustain Energy Rev* 32:238–254
- Barik D, Vijayaraghavan R (2020) Effects of waste chicken fat derived biodiesel on the performance and emission characteristics of a compression ignition engine. *Int J Ambient Energy* 41(1):88–97
- Bhatti HN, Hanif MA, Qasim M (2008) Biodiesel production from waste tallow. *Fuel* 87(13–14): 2961–2966
- Bockey D (2019) The significance and perspective of biodiesel production—a European and global view. *OCL* 26:40
- Brennan L, Owende P (2010) Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew Sustain Energy Rev* 14(2): 557–577
- Bušić A, Kundas S, Morzak G, Belskaya H, Mardetko N, Ivančić Šantek M, Šantek B et al (2018) Recent trends in biodiesel and biogas production. *Food Technol Biotechnol* 56(2):152–173
- Canakci M, Sanli H (2008) Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties. *J Ind Microbiol Biotechnol* 35(5):431–441
- Cantrell KB, Ducey T, Ro KS, Hunt PG (2008) Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. *Bioresour Technol* 99(17):7941–7953
- Carraretto C, Macor A, Mirandola A, Stoppato A, Tonon S (2004) Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations. *Energy* 29(12–15):2195–2211
- Castro T, Manso T, Mantecón AR, Guirao J, Jimeno V (2005) Fatty acid composition and carcass characteristics of growing lambs fed diets containing palm oil supplements. *Meat Sci* 69(4): 757–764
- Cernat A, Pana C, Negurescu N, Lazaroiu G, Nutu C, Fuiiorescu D, Nicolici A et al (2019) Combustion of preheated raw animal fats-diesel fuel blends at diesel engine. *J Therm Anal Calorim* 140:2369
- Chaker Ncibi M, Sillanpaa M (2013) Recent research and developments in biodiesel production from renewable bioresources. *Rec Pat Chem Eng* 6(3):184–193
- Chavan SB, Yadav M, Singh R, Singh V, Kumbhar RR, Sharma YC (2017) Production of biodiesel from three indigenous feedstock: optimization of process parameters and assessment of various fuel properties. *Environ Prog Sustain Energy* 36(3):788–795
- Chen CY, Yeh KL, Aisyah R, Lee DJ, Chang JS (2011) Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresour Technol* 102(1): 71–81
- Chisti Y (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv* 25:294–306
- Choi SP, Nguyen MT, Sim SJ (2010) Enzymatic pretreatment of *Chlamydomonas reinhardtii* biomass for ethanol production. *Bioresour Technol* 101(14):5330–5336
- Chung KH, Kim J, Lee KY (2009) Biodiesel production by transesterification of duck tallow with methanol on alkali catalysts. *Biomass Bioenergy* 33(1):155–158
- Da Rós PC, Silva GA, Mendes AA, Santos JC, de Castro HF (2010) Evaluation of the catalytic

- properties of Burkholderia cepacia lipase immobilized on non-commercial matrices to be used in biodiesel synthesis from different feedstocks. *Bioresour Technol* 101(14):5508–5516
- Demirbaş A (2006) Oily products from mosses and algae via pyrolysis. *Energy Sources Pt A* 28(10):933–940
- Demirbas A (2009) Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review. *Appl Energy* 86:S108–S117
- Dias JM, Alvim-Ferraz MC, Almeida MF (2009) Production of biodiesel from acid waste lard. *Bioresour Technol* 100(24):6355–6361
- Dragone G, Fernandes BD, Vicente AA, Teixeira JA (2010) Third generation biofuels from microalgae. *Curr Res Technol Edu Top Appl Microbiol Microb Biotechnol* 2:1355–1366
- Du Z, Li Y, Wang X, Wan Y, Chen Q, Wang C, Ruan R et al (2011) Microwave-assisted pyrolysis of microalgae for biofuel production. *Bioresour Technol* 102(7):4890–4896
- Duan P, Jin B, Xu Y, Yang Y, Bai X, Wang F, Miao J et al (2013) Thermo-chemical conversion of *Chlorella pyrenoidosa* to liquid biofuels. *Bioresour Technol* 133:197–205
- El-Mashad HM, Zhang R, Avena-Bustillos RJ (2008) A two-step process for biodiesel production from salmon oil. *Biosyst Eng* 99(2):220–227
- Encinar JM, Sánchez N, Martínez G, García L (2011) Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. *Bioresour Technol* 102(23):10907–10914
- Faba L, Díaz E, Ordóñez S (2015) Recent developments on the catalytic technologies for the transformation of biomass into biofuels: a patent survey. *Renew Sustain Energy Rev* 51:273–287
- Falkowski PG, Katz ME, Knoll AH, Quigg A, Raven JA, Schofield O, Taylor FJR (2004) The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science* 305(5682):354–360
- Fan X, Burton R (2009) Recent development of biodiesel feedstocks and the applications of glycerol: a review. *Open Fuels Energy Sci J* 2(1):100–109
- Felizardo P, Correia MJN, Raposo I, Mendes JF, Berkemeier R, Bordado JM (2006) Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Manag* 26(5):487–494
- Flach B, Lieberz S, Bolla S (2019) EU Biofuels Annual 2019, Gain Report NL9022, USDA Foreign Agricultural Service. <http://gain.fas.usda.gov/Pages/Default.aspx>. Accessed 6 May 2020
- Fu R, Fei Q, Shang L, Brigham CJ, Chang HN (2018) Enhanced microbial lipid production by *Cryptococcus albidus* in the high-cell-density continuous cultivation with membrane cell recycling and two-stage nutrient limitation. *J Ind Microbiol Biotechnol* 45(12):1045–1051
- Gebremariam SN, Marchetti JM (2018) Economics of biodiesel production. *Energ Conver Manage* 168:74–84
- Goyal HB, Seal D, Saxena RC (2008) Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 12(2):504–517
- Grima EM, Fernández FGA, Camacho FG, Chisti Y (1999) Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *J Biotechnol* 70:231–247
- Gumahin AC, Galamiton JM, Allerite MJ, Valmorida RS, Laranang JRL, Mabayo VIF, Ido AL et al (2019) Response surface optimization of biodiesel yield from pre-treated waste oil of rendered pork from a food processing industry. *Bioresour Bioprocess* 6(1):1–13

- Harun R, Danquah MK, Forde GM (2010) Microalgal biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production. *J Chem Technol Biotechnol* 85(2):199–203
- Harun R, Jason WSY, Cherrington T, Danquah MK (2011) Exploring alkaline pre-treatment of microalgal biomass for bioethanol production. *Appl Energy* 88(10):3464–3467
- He C, Mei Y, Zhang Y, Liu L, Li P, Zhang Z, Jiao Y et al (2020) Enhanced biodiesel production from diseased swine fat by ultrasound-assisted two-step catalyzed process. *Bioresour Technol* 304:123017
- Heimann K (2016) Novel approaches to microalgal and cyanobacterial cultivation for bioenergy and biofuel production. *Curr Opin Biotechnol* 38:183–189
- Helwani Z, Othman MR, Aziz N, Fernando WJN, Kim J (2009a) Technologies for production of biodiesel focusing on green catalytic techniques: a review. *Fuel Process Technol* 90(12): 1502–1514
- Helwani Z, Othman MR, Aziz N, Kim J, Fernando WJN (2009b) Solid heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides with methanol: a review. *Appl Catal A Gen* 363(1–2):1–10
- Herskowirz M, Landau M, Reizner I, Kaliya M(2006) Production of diesel fuel from vegetable and animal oils. US Patent Application US2006207166. Accessed 28 Sep 2006
- Herskowitz M (2008) Reaction system for production of diesel fuel from vegetable and animal oils. World Patent WO2008035155. Accessed 20 Mar 2008
- Hoff MV, Benson T, Bell J, Pugh M (2012) Biodiesel fuel production, separation methods and systems. US Patent 13765782. Accessed 16 Feb 2012
- Huong LTT, Tan PM, Hoa TTV (2011) Biodiesel production from fat of Tra catfish via heterogeneous basic-catalyzed transesterification using ultrasonic mixing. *E-J. Surf Sci Nanotechnol* 9: 477–481
- Janssen M, Tramper J, Mur LR, Wijffels RH (2003) Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects. *Biotechnol Bioeng* 81(2): 193–210
- Jayatilakan K, Sultana K, Radhakrishna K, Bawa AS (2012) Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *J Food Sci Technol* 49(3): 278–293
- Johnson MB, Wen Z (2009) Production of biodiesel fuel from the microalga *Schizochytrium limacinum* by direct transesterification of algal biomass. *Energy Fuel* 23(10):5179–5183
- Joshi G, Pandey JK, Rana S, Rawat DS (2017) Challenges and opportunities for the application of biofuel. *Renew Sustain Energy Rev* 79:850–866
- Juneja A, Ceballos RM, Murthy GS (2013) Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: a review. *Energies* 6(9): 4607–4638
- Kale A, Zullo LC, Shinde S (2012) Methods of and systems for producing biofuels from algal oil. US20128313648
- Keihani M, Esmaili H, Rouhi P (2018) Biodiesel production from chicken fat using nano-calcium oxide catalyst and improving the fuel properties via blending with diesel. *Phys Chem Res* 6(3): 521–529
- Kim M, DiMaggio C, Yan S, Wang H, Salley SO, Ng KS (2011) Performance of heterogeneous

- ZrO₂ supported metal oxide catalysts for brown grease esterification and sulfur removal. *Bioresour Technol* 102(3):2380–2386
- Kim JK, Um BH, Kim TH (2012) Bioethanol production from micro-algae, *Schizochytrium* sp., using hydrothermal treatment and biological conversion. *Korean J Chem Eng* 29(2):209–214
- Kirubakaran M, Selvan VAM (2018) A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renew Sustain Energy Rev* 82:390–401
- Kour D, Rana KL, Yadav N, Yadav AN, Rastegari AA, Singh C, Saxena AK et al (2019) Technologies for biofuel production: current development, challenges, and future prospects. In: *Prospects of renewable bioprocessing in future energy systems*. Springer, Cham, pp 1–50
- Koutra E, Economou CN, Tsafrakidou P, Kornaros M (2018) Bio-based products from microalgae cultivated in digestates. *Trends Biotechnol* 36(8):819–833
- Kpan JD, Krah J (2019) Sustaining the oxidation stability of biodiesel and its blends in plug-in hybrid vehicles using adsorbents. *Energy Fuel* 33(11):11181–11186
- Kristi M, Milbrandt AR, Warner E, Lewis JE, Schwab AA (2018) 2016 bioenergy industry status report (No. NREL/TP-5400-70397). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO
- Lam MK, Lee KT (2010) Accelerating transesterification reaction with biodiesel as co-solvent: a case study for solid acid sulfated tin oxide catalyst. *Fuel* 89(12):3866–3870
- Lavella PSR, Pullo P, Pullo GV (2014) Method and system for integrated biodiesel production. U.- S. Patent US20140020282A1. Accessed 23 Jan 2014
- Lawan I, Garba ZN, Zhou W, Zhang M, Yuan Z (2020) Synergies between the microwave reactor and CaO/zeolite catalyst in waste lard biodiesel production. *Renew Energy* 145:2550–2560
- Lee YK (2001) Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential. *J Appl Phycol* 13(4):307–315
- Lee KT, Foglia TA, Chang KS (2002) Production of alkyl ester as biodiesel from fractionated lard and restaurant grease. *J Am Oil Chem Soc* 79(2):191–195
- Lee S, Oh Y, Kim D, Kwon D, Lee C, Lee J (2011) Converting carbohydrates extracted from marine algae into ethanol using various ethanolic *Escherichia coli* strains. *Appl Biochem Biotechnol* 164(6):878–888
- Leung DY, Wu X, Leung MKH (2010) A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Appl Energy* 87(4):1083–1095
- Li Y, Horsman M, Wu N, Lan CQ, Dubois-Calero N (2008) Biofuels from microalgae. *Biotechnol Prog* 24(4):815–820
- Li H, Lv P, Wang Z, Miao C, Yuan Z (2020) Biodiesel continuous esterification process experimental study and equipment design. *Biomass Convers Bioref*:1–8
- Lin CW, Tsai SW (2015) Production of biodiesel from chicken wastes by various alcohol-catalyst combinations. *J Energy S Afr* 26(1):36–45
- Lotero E, Liu Y, Lopez DE, Suwannakarn K, Bruce DA, Goodwin JG (2005) Synthesis of biodiesel via acid catalysis. *Ind Eng Chem Res* 44(14):5353–5363
- Lourinho G, Brito P (2015) Advanced biodiesel production technologies: novel developments.

- Rev Environ Sci Biotechnol 14(2):287–316
- Lu J, Nie K, Xie F, Wang F, Tan T (2007) Enzymatic synthesis of fatty acid methyl esters from lard with immobilized *Candida* sp. 99-125. *Process Biochem* 42(9):1367–1370
- Ma F, Hanna MA (1999) Biodiesel production: a review. *Bioresour Technol* 70(1):1–15
- Mahlia TMI, Syazmi ZAH, Mofijur M, Abas AP, Bilad MR, Ong HC, Silitonga AS (2020) Patent landscape review on biodiesel production: technology updates. *Renew Sustain Energy Rev* 118: 109526
- Mansir N, Teo SH, Rashid U, Saiman MI, Tan YP, Alsultan GA, Taufiq-Yap YH (2018) Modified waste egg shell derived bifunctional catalyst for biodiesel production from high FFA waste cooking oil. A review. *Renew Sustain Energy Rev* 82:3645–3655
- Mata TM, Cardoso N, Ornelas M, Neves S, Caetano NS (2010) Sustainable production of biodiesel from tallow, lard and poultry fat and its quality evaluation. *Chem Eng Trans* 19:13–18
- Mata TM, Mendes AM, Caetano NS, Martins AA (2014) Properties and sustainability of biodiesel from animal fats and fish oil. *Chem Eng Trans* 38:175–180
- Matsumura M (2015) Method for producing biodiesel fuel. Japanese Patent JP2005350632A. Accessed 22 Dec 2015
- Meng X, Yang J, Xu X, Zhang L, Nie Q, Xian M (2009) Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renew Energy* 34(1):1–5
- Metting FB (1996) Biodiversity and application of microalgae. *J Ind Microbiol* 17(5):477–489
- Miao X, Wu Q (2004) High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*. *J Biotechnol* 110(1):85–93
- Mirón AS, Gomez AC, Camacho FG, Grima EM, Chisti Y (1999) Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. In: *Progress in industrial microbiology*, vol 35. Elsevier, Amsterdam, pp 249–270
- Miyamoto K (ed) (1997) *Renewable biological systems for alternative sustainable energy production* (no. 128). FAO, Rome
- Mora L, Toldrá-Reig F, Reig M, Toldrá F (2019) Possible uses of processed slaughter byproducts. In: *Sustainable meat production and processing*. Academic Press, pp 145–160
- Mora L, Toldrá-Reig F, Prates JAM, Toldrá F (2020) Cattle by-products. In: Simpson BK, Aryee AN, Toldrá F (eds) *Byproducts from agriculture and fisheries: adding value for food, feed, pharma and fuels*. Wiley, Chichester, West Sussex, pp 43–55
- Musa IA (2016) The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egypt J Pet* 25(1):21–31
- Mutreja V, Singh S, Ali A (2011) Biodiesel from mutton fat using KOH impregnated MgO as heterogeneous catalysts. *Renew Energy* 36(8):2253–2258
- Nguyen MT, Choi SP, Lee JW, Lee JH, Sim SJ (2009) Hydrothermal acid pretreatment of *Chlamydomonas reinhardtii* biomass for ethanol production. *J Microbiol Biotechnol* 19(2): 161–166
- Nigam PS, Singh A (2011) Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog Energy Combust Sci* 37(1):52–68
- Olivieri G, Marzocchella A, Andreozzi R, Pinto G, Pollio A (2011) Biodiesel production from

- Stichococcus strains at laboratory scale. *J Chem Technol Biotechnol* 86(6):776–783
- Öner C, Altun Ş (2009) Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. *Appl Energy* 86(10): 2114–2120
- Oyler JR (2012) Process of producing oil from algae using biological rupturing. US20120285077 Phan AN, Phan TM (2008) Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel* 87(17–18):3490–3496
- Pinnarat T, Savage PE (2008) Assessment of noncatalytic biodiesel synthesis using supercritical reaction conditions. *Ind Eng Chem Res* 47(18):6801–6808
- Pollardo AA, Lee HS, Lee D, Kim S, Kim J (2018) Solvent effect on the enzymatic production of biodiesel from waste animal fat. *J Clean Prod* 185:382–388
- Predojević ZJ (2008) The production of biodiesel from waste frying oils: a comparison of different purification steps. *Fuel* 87(17–18):3522–3528
- Priya ND, Thirumarimurugan M (2020) Biodiesel—a review on recent advancements in production. *Bioresour Util Bioprocess*:117–129
- Ramadhas AS, Jayaraj S, Muraleedharan C (2005) Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel* 84(4):335–340
- Ramos M, Dias APS, Puna JF, Gomes J, Bordado JC (2019) Biodiesel production processes and sustainable raw materials. *Energies* 12(23):4408
- Realini CE, Duckett SK, Brito GW, Dalla Rizza M, De Mattos D (2004) Effect of pasture vs. concentrate feeding with or without antioxidants on carcass characteristics, fatty acid composition, and quality of Uruguayan beef. *Meat Sci* 66(3):567–577
- Reddy HK, Muppaneni T, Patil PD, Ponnusamy S, Cooke P, Schaub T, Deng S (2014) Direct conversion of wet algae to crude biodiesel under supercritical ethanol conditions. *Fuel* 115:720–726
- Rezania S, Oryani B, Park J, Hashemi B, Yadav KK, Kwon EE, Cho J et al (2019) Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications. *Energ Conver Manage* 201:112155
- Rodionova MV, Poudyal RS, Tiwari I, Voloshin RA, Zharmukhamedov SK, Nam HG, Allakhverdiev SI et al (2017) Biofuel production: challenges and opportunities. *Int J Hydrogen Energy* 42(12):8450–8461
- Rosson E, Sgarbossa P, Pedrielli F, Mozzon M, Bertani R (2020) Bioliquids from raw waste animal fats: an alternative renewable energy source. *Biomass Convers Bioref*:1–16
- Saeong P, Saisriyoot M, Thanapimmetha A, Srinophakun P (2017) The response surface optimization of sterol glucosides removal in palm biodiesel using silica adsorption. *Fuel* 191:1–9
- Sai Akhil U, Alagumalai A (2019) A short review on valorization of slaughterhouse wastes for biodiesel production. *Chem Select* 4(45):13356–13362
- Sander A, Koščak MA, Kosir D, Milosavljević N, Vuković JP, Magić L (2018) The influence of animal fat type and purification conditions on biodiesel quality. *Renew Energy* 118:752–760
- Schenk PM, Thomas-Hall SR, Stephens E, Marx UC, Mussgnug JH, Posten C, Hankamer B et al (2008) Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production.

Bioenergy Res 1(1):20–43

Scott M (2014) Process for producing biodiesel and related products. World Patent WO2014202980A3. Accessed 19 Jun 2014

Scott M (2017) US patent application no. 15/693,655

Scott SA, Davey MP, Dennis JS, Horst I, Howe CJ, Lea-Smith DJ, Smith AG (2010) Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Curr Opin Biotechnol* 21(3):277–286

Seefeldt LC (2007) Utah group plans to make biodiesel from algae. *Ind Bioprocess* 29:5–6

Seffati K, Honarvar B, Esmaeili H, Esfandiari N (2019) Enhanced biodiesel production from chicken fat using CaO/CuFe₂O₄ nanocatalyst and its combination with diesel to improve fuel properties. *Fuel* 235:1238–1244

Seffati K, Esmaeili H, Honarvar B, Esfandiari N (2020) AC/CuFe₂O₄@ CaO as a novel nanocatalyst to produce biodiesel from chicken fat. *Renew Energy* 147:25–34

Shaghghi S, Ghahderijani M, Hadi Dehrouyeh, M. (2020) Optimization of indicators pollutant emission following blending diesel fuel with waste oil-derived biodiesel. *J Oleo Sci* 69(4): 337–346

Sharma YC, Singh B (2009) Development of biodiesel: current scenario. *Renew Sustain Energy Rev* 13(6–7):1646–1651

Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, Roessler P (1998) A look back at the US Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae. *Natl Renew Energy Lab* 328:1–294

Shi W, Li J, He B, Yan F, Cui Z, Wu K, Cheng Y et al (2013) Biodiesel production from waste chicken fat with low free fatty acids by an integrated catalytic process of composite membrane and sodium methoxide. *Bioresour Technol* 139:316–322

Shin HY, Lee SH, Ryu JH, Bae SY (2012) Biodiesel production from waste lard using supercritical methanol. *J Supercrit Fluids* 61:134–138

Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A (2006) Commercial applications of microalgae. *J Biosci Bioeng* 101(2):87–96

Stavarache C, Vinatoru M, Maeda Y (2007) Aspects of ultrasonically assisted transesterification of various vegetable oils with methanol. *Ultrason Sonochem* 14(3):380–386

Talebian-Kiakalaieh A, Amin NAS, Mazaheri H (2013) A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. *Appl Energy* 104:683–710

Tariq M, Ali S, Khalid N (2012) Activity of homogeneous and heterogeneous catalysts, spectroscopic and chromatographic characterization of biodiesel: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 16(8):6303–6316

Terry KL, Raymond LP (1985) System design for the autotrophic production of microalgae. *Enzyme Microb Technol* 7(10):474–487

Thangaraj B, Solomon PR, Muniyandi B, Ranganathan S, Lin L (2019) Catalysis in biodiesel production—a review. *Clean Energy* 3(1):2–23

Toldrá F, Rubio MA, Navarro JL, Cabrerizo L (2004) Quality aspects of pork meat and its nutritional impact. In: *Quality of fresh and processed foods*, pp 25–31

Toldrá F, Mora L, Reig M (2016) New insights into meat by-product utilization. *Meat Sci*

120:54–59

- Toldrá-Reig F, Mora L, Toldrá F (2020) Trends in biodiesel production from animal fat waste. *Appl Sci* 10(10):3644
- Tomes D, Lakshmanan P, Songstad D (eds) (2010) *Biofuels: global impact on renewable energy, production agriculture, and technological advancements*. Springer Science & Business Media, Berlin
- Ueno Y, Kurano N, Miyachi S (1998) Ethanol production by dark fermentation in the marine green alga, *Chlorococcum littorale*. *J Ferment Bioeng* 86(1):38–43
- Van Gerpen J (2005) Biodiesel processing and production. *Fuel Process Technol* 86(10): 1097–1107
- Van Kasteren JMN, Nisworo AP (2007) A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. *Resour Conserv Recycl* 50(4):442–458
- Vasudevan PT, Briggs M (2008) Biodiesel production—current state of the art and challenges. *J Ind Microbiol Biotechnol* 35(5):421
- Vicente G, Martínez M, Aracil J (2004) Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresour Technol* 92(3):297–305
- Walsh C (2014) The use of animal by-products. EBLEX, Stoneleigh Park, pp 1–73
- Wang S, Sun X, Yuan Q (2018) Strategies for enhancing microbial tolerance to inhibitors for biofuel production: a review. *Bioresour Technol* 258:302–309
- Xu R, Mi Y (2011) Simplifying the process of microalgal biodiesel production through in situ transesterification technology. *J Am Oil Chem Soc* 88(1):91–99
- Xue J, Grift TE, Hansen AC (2011) Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renew Sustain Energy Rev* 15(2):1098–1116
- Yan Y, Li X, Wang G, Gui X, Li G, Su F, Liu T et al (2014) Biotechnological preparation of biodiesel and its high-valued derivatives: a review. *Appl Energy* 113:1614–1631
- Zalouk S, Barbati S, Sergent M, Ambrosio M (2009) Disposal of animal by-products by wet air oxidation: performance optimization and kinetics. *Chemosphere* 74(2):193–199
- Zduńczyk Z, Gruzauskas R, Semaskaite A, Juskiewicz J, Raceviciute-Stupeliene A, Wróblewska M (2011) Fatty acid profile of breast muscle of broiler chickens fed diets with different levels of selenium and vitamin E. *Archiv für Geflügelkunde* 75(4):264–267
- Zhang L, Li X, Yong Q, Yang ST, Ouyang J, Yu S (2016) Impacts of lignocellulose-derived inhibitors on L-lactic acid fermentation by *Rhizopus oryzae*. *Bioresour Technol* 203:173–180
- Zou S, Wu Y, Yang M, Li C, Tong J (2009) Thermochemical catalytic liquefaction of the marine microalgae *Dunaliella tertiolecta* and characterization of bio-oils. *Energy Fuel* 23(7):3753–3758



Mashhad University of
Medical Sciences
Vice Chancellor for
Research and Technology

Food Waste to Green Fuel: Trend & Development

Neha Srivastava
Maqsood Ahmad Malik

Translated by:

Dr. Ziaeddin Bonyadi
Mohaddeseh Zahmatkesh Anbarani