مروری بر مزایا، محدودیت‌ها، محصولات جانبی و کاربرد فناوری‌های اصلی تبدیل پسماند به انرژی و سوخت زیستی

محمد صفری[۱]، مریم احمدی[۲]، غلامحسین صفری[۳،۴،*]

۱- دانشجوی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران

۲- کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

۳*- مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

۴-گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: Email: hsafari13@yahoo.com

تاریخ دریافت : ۱۴۰۱/۰۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۲/۰۱/۳۰

چکیده

پردازش زیست توده خام برای تولید انرژی، سوخت و مواد شیمیایی از طریق ترکیبی از فناوری‌های مختلف کاربردی، مسیری امیدوارکننده برای دستیابی به مدیریت پایدار پسماند، با مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی فراوان در نظر گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر فرآیندهای اصلی مرتبط با بازیافت انرژی و تولید سوخت زیستی تحت عنوان پالایشگاه‌های زیستی پسماند بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. به‌طور کلی فناوری‌های اصلی تبدیل پسماند به انرژی و سوخت زیستی به فرایندهای ترموشیمیایی، از قبیل احتراق، تبدیل به گاز، انفجار بخار، پیرولیز، مایع سازی هیدروترمال، و تروفیشن (برشته کردن)، فرایندهای بیولوژیکی همانند هضم بی‌هوازی، تخمیر، تصفیه آنزیمی و الکترولیز میکروبی و فرایندهای شیمیایی مانند هیدرولیز، استخراج با حلال، ترانس استریفیکاسیون و تبدیل فوق بحرانی طبقه‌بندی می‌شوند. استفاده از فرآیندهای بازیافت انرژی و تولید سوخت زیستی بصورت منفرد و تکی همیشه با محدودیت‌های زیادی همراه است و چندین برابر محصولات ناخواسته تولید می‌کنند در حالی‌که ترکیب چندین فرآیند در یک پالایشگاه زیستی مواد زائد امکان کاهش و حذف نواقصات هر فرآیند را فراهم می‌کند و منجر به افزایش بهره‌وری می‌شود. در این مقاله امکان استفاده از باقیمانده پسماندهای پس پردازش شده به عنوان منابع تجدیدپذیر زیستی فراوان وکم هزینه در پالایشگاه های زیستی پسماند مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا خلاصه‌ای از مزایا، محدودیت‌ها، محصولات و فرآورده‌های جانبی و همچنین کاربرد فرآیندهای مختلف ترموشیمیایی، بیولوژیکی و شیمیایی مورد استفاده در تبدیل پسماند به انرژی و سوخت زیستی ارائه شد. سپس یک مرور تاریخی و فنی از وضعیت فعلی فناوری‌های اصلی تبدیل پسماند به انرژی و سوخت زیستی در راستای استفاده از آنها به عنوان ابزاری برای مدیریت باقیمانده پسماندهای پردازش شده و محصولات جانبی ناشی از آنها مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت در مورد پیشرفت‌های آتی در مورد فرایندهای ذکر شده به اختصار بحث شد.

کلیدواژه: "زیست سوخت"، "بازیافت انرژی"، "مواد زائد"، "زیست انرژی"، پالایشگاه زیستی

۱- مقدمه

مواد زائد (ضایعات) را می‌توان به عنوان هر نوع ماده یا شیئی تعریف کرد که استفاده دیگری ندارد و قرار است دور انداخته شود (Europeia, 2006). از این نظر، تولید مواد زائد در جامعه مبتنی بر مصرف اجتناب‌ناپذیر است و مدیریت مواد زائد را با در نظر گرفتن مقادیر عظیمی از پسماندها که در سطح جهانی تولید می‌شود، به چالشی بزرگ تبدیل می‌کند. در واقع، در سال ۲۰۱۴ حدود ۲/۶ میلیارد تن پسماند در اتحادیه اروپا (EU[1]) تولید شد که از این میزان ۴۱ درصد در محل های دفن پسماند دفع شد، ۳۶ درصد بازیافت شد، ۱۰ درصد در عملیات خاکبرداری استفاده شد، ۷ درصد در تصفیه خانه های فاضلاب تصفیه شد و ۶ درصد باقیمانده نیز برای تولید انرژی یا به منظور تخریب سوزانده شد. بر این اساس، در دهه‌های اخیر، بشریت تمرکز خود را بر مدیریت سنتی پسماند از مفهوم «جمع‌آوری و دفع» به نفع مدیریت هرمی سلسله مراتب پسماند به منظور افزایش پایداری تغییر داده است (Unit, 2017). با این حال، حتی زمانی که اقدامات سازگار با محیط زیست مانند بازیافت و استفاده مجدد انجام می شود، بسیاری از عملیات‌ها "بدیافت[2]" انجام می شود، به این معنی که محصول بازیافتی دارای ارزش اقتصادی کمتر از هدف اصلی خود است. به این ترتیب، مدل اقتصاد خطی مبتنی بر سلسله مراتب هرمی مواد زائد که امروزه تمایل به استفاده از آن وجود دارد، نیز دارای محدودیت‌هایی است. در واقع، هنوز فرصت هایی برای افزایش بهره وری در بسیاری از فرآیندهای صنعتی وجود دارد، اما این دستاوردها احتمالاً به طور فزاینده ای حاشیه‌ای و غیرمتمایز خواهند بود. بنابراین، پذیرش آینده مفهوم اقتصاد چرخشی، برخلاف مدل خطی کنونی، یک تغییر پارادایم (نمونه) ضروری است. این مفهوم جدید به طور فزاینده ای به عنوان منبعی برای نوآوری در محصولات، فرآیندها و مدل های کسب و کار در نظر گرفته می شود و فرصت های عالی را باز می کند که باید توسط شرکت ها و سازمان ها به عنوان مزیت های رقابتی در یک

[1]- European Union

[2]- Downcycling

بازار پویا و جهانی تلقی شود (Leitão, 2015). به طور خاص، با یک جریان چرخشی در مصرف منابع، هر پسماند تولید شده، یک ماده خام بالقوه برای فرآیند دیگری است که راه های جدیدی برای ارزش گذاری و توسعه محصولات نسل دوم و سوم را معرفی می کند. مزایا واضح است زیرا پسماندهای کمتری بدون تصفیه تولید و دفع می شوند و به طور بالقوه آلودگی زیست محیطی را کاهش می دهند. دانش به روز شده از فن آوری های فعلی یک عامل مهم در تعیین مناسب ترین فرآیندها برای ارزش گذاری انواع مختلف پسماند در پالایشگاه های زیستی آینده است. این پالایشگاه‌های زیستی ضایعات، تسهیلاتی هستند که فناوری‌های لازم را به منظور تبدیل مواد اولیه زیست توده و سایر ضایعات به محصولات قابل استفاده، ادغام می‌کنند و تضمین می‌کنند که اقتصاد چرخشی از تئوری به دنیای واقعی منتقل می‌شود. جریان‌های مواد زائد موجود می‌توانند با فناوری‌های تولید سوخت‌های زیستی (تبدیل پسماند به مایع، WtL[1]) یا انرژی (پسماند به انرژی، WtE[2]) تبدیل شوند که انتظار می‌رود هر دو دسته یک عنصر کلیدی در مدیریت آینده پسماند باشند. بر این اساس، در این مقاله، به طور خلاصه وضعیت فعلی فناوری‌های اصلی WtL و WtE را در راستای استفاده از آنها به عنوان ابزاری برای مدیریت باقیمانده پسماندها پس از پردازش و محصولات جانبی ناشی از آنها مورد مطالعه قرار می دهیم و در نهایت در مورد پیشرفت های آینده در مورد گزینه های فنی ذکر شده به اختصار بحث می شود (Garcia, Lourinho et al., 2019).

۲- روش انجام تحقیق

پژوهش حاضر یک مطالعه توصیفی- مروری است که داده-های آن از طریق مطالعات کتابخانه‌ای به دست آمده و از منابع مختلف به منظور پردازش مطالب استفاده شده است .با توجه به اهمیت سوخت‌های زیستی به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر سعی گردید تا حد امکان از مرتبط‌ترین و به-روزترین منابع حاوی نکات ارزنده در رابطه با انواع فناوری-های تولید انرژی و سوخت‌زیستی از زیست توده استفاده شود. در این مقاله مروری امکان استفاده از باقیمانده پسماندهای پس پردازش شده به عنوان منابع تجدیدپذیر زیستی در دسترس وکم هزینه در پالایشگاه های زیستی پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا یک مرور تاریخی و فنی از وضعیت فعلی فناوری‌های اصلی تبدیل پسماند به انرژی و سوخت زیستی در راستای استفاده از آنها به عنوان ابزاری برای مدیریت باقیمانده پسماندها پردازش شده و محصولات جانبی ناشی از آنها مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت در مورد پیشرفت‌های آتی در مورد گزینه‌های فنی ذکر شده به اختصار بحث شد.

- **مروری تاریخی و فنی بر فناوری‌های تبدیل پسماند به مایع (WtL) و پسماند به انرژی (WtE)**

پالایشگاه های زیستی راهی برای دستیابی به مدیریت پایدار پسماند با مزایای زیست محیطی و اقتصادی فراوان است. با این حال، جریان‌های پسماند اغلب از نظر گزینه‌های فناوری مناسب برای ارزش‌گذاری آنها بسیار انتخابی هستند. به این ترتیب، درک کامل هر فناوری منبعی اساسی است برای تعیین اینکه آیا ضایعات مختلف موجود را می‌توان به‌عنوان ماده خام برای محصولات با ارزش در نظر گرفت یا نه. در جداول ۱، ۲، ۳ بطور خلاصه مزایا، محدودیت-ها، محصولات و کاربرد فرآیندهای مختلف ترموشیمیایی، بیولوژیکی و شیمیایی مورد بحث در این زمینه ارائه شده است و در ادامه به شرح مختصری از هر کدام از فناوری فوق پرداخته می‌شود. (Garcia, Lourinho et al., 2019)

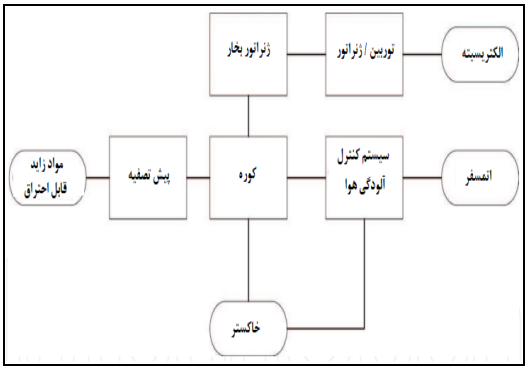
۳- نتایج

- **فرایندهای ترموشیمیایی تولید انرژی و سوخت زیستی از پسماند**
- **سوزاندن / احتراق[3]**

احتراق رایج ترین فناوری بازیافت انرژی از پسماند است که در تولید گرما، بخار و الکتریسیته استفاده می شود. از نظر تاریخی، این فناوری یکی از «کثیف‌ترین» و آلاینده‌ترین فرآیندها در مدیریت و دفع پسماندها محسوب می‌شود. با این حال، پیشرفت در تصفیه انتشار گازهای گلخانه‌ای در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰، همراه با توسعه فن آوری های کارامد و تحت کنترل و پیش تصفیه پسماند، مجددا منجر به جلب توجه محققان و سرمایه گذاران در سراسر جهان به فرایند احتراق شده است (Garcia, Lourinho et al., 2019). سوزاندن در حقیقت اکسیداسیون سریع پسماند در دمای بالا است. همچنین به عنوان احتراق شعله کنترل شده یا کلسیناسیون نیز شناخته می شود و فناوری است که ترکیبات آلی موجود در مواد زائد را از بین می برد. تکنیک های جدیدی برای این فرآیند سوزاندن توسعه داده شده است که به عنوان روش های تولید انرژی استفاده می شود (Fathima, Rao et al., 2014). سوزاندن یک تکنیک تصفیه مواد زائد حرارتی است که می تواند به عنوان یک فرآیند احتراق کنترل شده با هدف اصلی کاهش حجم و بازیافت انرژی از جریان پسماند استفاده شود. سوزاندن محبوب ترین تکنیک WtE است که به موجب آن گرمای تولید شده از احتراق را می توان بازیافت و به نیروی الکتریکی تبدیل کرد محتوای آلی زباله سوزانده می شود و گرما تولید می شود، در حالی که محتوای غیر آلی به تشکیل خاکستر کمک می کند. محصولات نهایی سوزاندن شامل خاکستر، گرما و گازهای حاصل از احتراق است (Reddy, 2011; Klinghoffer and Castaldi 2013). برای بهره

[1] - Waste to Liquid
[2] - Waste to Energy
[3]- Incineration/Combustion

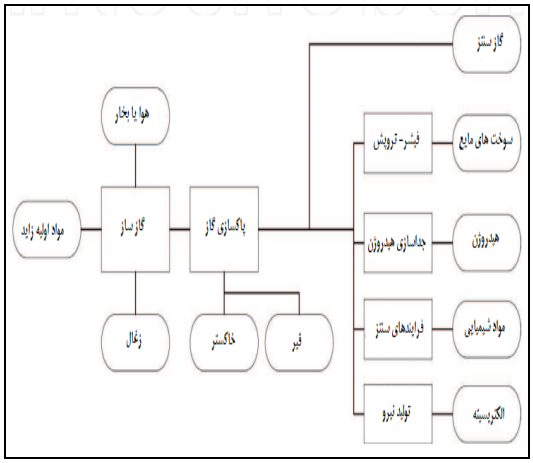
وری بهینه، هر زباله سوز باید بر روی "سه T" متمرکز شود. سه T مخفف «زمان»، «دما» و «تلاطم» هستند. این سه T نقش بسیار مهمی در تعیین کارایی یک زباله سوز ایفا می کنند. زمان در هر سیستم زباله سوز با زمان ماندن گازهای دودکش در سیستم ثانویه مطابقت دارد. دما در محفظه(های) سوزاندن مسئول احتراق کامل مواد آلی است. بیشتر کوره های زباله سوز برای کارکرد در محدوده ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس طراحی شده اند. اختلاط نشان دهنده آشفتگی در اتاقک ها است. تلاطم کافی یک پارامتر ضروری است که بر راندمان احتراق تأثیر می گذارد (Moharir, Gautam et al., 2019). به طور کلی، یک مرکز احتراق مدرن شامل خط پیش تصفیه و/یا جداسازی است که از آنجا پسماندها به طور مداوم و یکنواخت به کوره تغذیه می شوند (شکل ۱). این کوره در دمای بسیار بالا کار می کند تا از احتراق کامل پسماند اطمینان حاصل شود. پارامترهای احتراق به طور مداوم کنترل می شوند و انتشارات در مجموعه ای از فیلترها برای اطمینان از حذف آلاینده های سمی تصفیه می شوند. بطوریکه در یک فناوری تبدیل پسماند به انرژی، احتراق با جدیدترین مطالعات متمرکز بر بازیابی انرژی و خاکستر حاصل از احتراق یا سوزاندن همزمان پسماندهای مختلف در تجهیزات غیر تخصصی بسیار کامل است (Kijo-Kleczkowska, Środa et al., 2016). در واقع، این فرآیند به طور گسترده برای بازیافت انرژی حرارتی انواع مختلف پسماند با ارزش حرارتی خوب استفاده می شود (Syed-Hassan, Wang et al., 2017). به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۶، ۲۸ درصد از پسماند های جامد شهری (MSW[1]) تولید شده در ۲۸ عضو اتحادیه اروپا سوزانده شد. علاوه بر این، حدود ۱۳/۱ درصد از پسماند های خطرناک با بازیافت و یا بدون بازیافت انرژی سوزانده شدند (Garcia, Lourinho et al., 2019).



شکل ۱- طرح شماتیک از فناوری احتراق/ سوزاندن

- **گازی سازی (تبدیل به گاز)[2]**

گازی سازی یک فرآیند تجزیه ترموشیمیایی است که بدون حضور اکسیژن کافی برای احتراق کامل اتفاق می افتد و امکان تبدیل مواد اولیه زائد را به گاز قابل احتراق به نام گاز سنتز، یک سوخت با کاربردهای بالقوه زیاد فراهم می کند (شکل ۲). به عنوان یک فناوری، گازی‌سازی دارای تاریخچه‌ای طولانی است که همراه با پیشرفت‌ها به مرور زمان تکامل یافته است. این فناوری که به طور گسترده در طول انقلاب صنعتی در دهه ۱۸۵۰ برای روشن کردن کارخانه‌ها، خیابان‌ها و خانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از این فناوری در طول قرن بیستم کنار گذاشته شد و اخیراً به دلیل تهدیدات امنیت انرژی و تغییرات آب و هوایی، پشتیبانی مستمری به منظور توسعه آن کسب شده است (Garcia, Lourinho et al., 2019). در حقیقت گازی شدن به فرآیند تبدیل ترکیبات آلی به گاز سنتز تحت تأثیر دمای بالا و سطوح کنترل شده اکسیژن اشاره دارد. گاز سنتز را می توان بیشتر یا برای به دست آوردن انرژی احتراق کرد یا برای تولید زیرلایه سوخت شیمیایی استفاده کرد. روش گازی سازی اخیراً برای کاربردهای تولید انرژی از MSW در نظر گرفته شده است، اگرچه روش گازی سازی CO_2 کمتری در مقایسه با بازده زباله سوزاها با همان ظرفیت تولید می کند (Yap and Nixon 2015; Pratap, Bombaywala et al., 2021) در میان فرآیندهای WtE، گازی‌سازی یکی از امیدوارکننده‌ترین فرآیندها با برخی موانع خاص است که عدم استفاده از آن را در بخش‌های خانگی و تجاری توضیح می‌دهد. یک بررسی گسترده در مورد پیشرفت فناوری، نشان داد که ۵۰ شرکت نیروگاه‌های گازی‌سازی در مقیاس تجاری را در اروپا، ایالات متحده آمریکا و کانادا ارائه می‌کنند که عمدتاً دارای سیستم‌های با بستر سیال و جریان رو به پایین (به ترتیب با ۷۵ و ۲۰ درصد) هستند. علاوه بر این، در سال ۲۰۱۳ بیش از ۲۷۲ نیروگاه گازی‌سازی در سراسر جهان فعال بود که تعداد بیشتری از آنها در دست ساخت و برنامه ریزی تا سال ۲۰۱۹ بود (Garcia, Lourinho et al., 2019). گازی شدن در مقایسه با سوزاندن و پیرولیز یک فناوری پاک‌تر است، اما نیاز به پیش تصفیه و شستشوی گاز سنتز تولیدی دارد، بنابراین گازی‌سازی را به یک فرآیند چالش‌برانگیز و پرهزینه تبدیل می‌کند (Rios, González et al., 2018).



شکل ۲- طرح شماتیک از فناوری گازی سازی

توسعه زنجیره تامین، پیش تصفیه مواد زائد (خشک کردن/ آسیاب کردن/ پلیت سازی) و نیاز بالقوه برای تصفیه گاز سنتز معمولاً به عنوان موانع اصلی ذکر می‌شوند. سیستم های

[1]- Municipal Solid Waste
[2]- Gasification

خشک کن معمولی گران و انرژی بر هستند. علاوه بر این، خشک شدن کامل زیست توده نشان دهنده کاهش مقدار هیدروژنی است که به طور بالقوه در طی تبدیل به گاز قابل تولید است. خشک کردن خورشیدی، اگرچه ناکارآمد است، اما ارزان است و باید به عنوان یک جایگزین مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. وجود احتمالی قطران، انتشار ذرات، SO_x، NO_x و NH_3 در گاز سنتز نیز دامنه استفاده آن را محدود می کند. فیلتراسیون گاز سنتز برای به دست آوردن گاز سنتز عاری از آلاینده ها مهم است اما به تمیز کردن مداوم فیلترها به عنوان راهی برای جلوگیری از انسداد و افت فشار نیاز دارد. قطران به عنوان پیچیده ترین آلاینده مطرح می‌باشد. علاوه بر فیلتراسیون، می توان از تجزیه حرارتی و کراکینگ کاتالیزوری نیز به عنوان نوعی تصفیه استفاده کرد (Han and Kim 2008). تجزیه حرارتی منجر به ذوب خاکستر می شود که همچنین می تواند منجر به مشکلات مکانیکی شود. تصفیه کاتالیزوری به عنوان موثرترین روش برای مقابله با قطران است اما در برابر ذرات و سایر گازهای سمی بی اثر است. ترکیبی از فرایندهای مختلف تصفیه بهترین راه حل است (Rios, González et al., 2018). ثابت شده است که پیش تصفیه مواد زائد و زیست توده برای تبدیل به گاز، و همچنین طراحی راکتور و بهینه سازی شرایط عملیاتی، برای به حداکثر رساندن راندمان تبدیل، قابلیت بقاء و سودآوری اهمیت زیادی دارد. در این راستا، روش هایی ساده‌ای مانند مرتب سازی، آسیاب کردن و الک کردن ضروری هستند (Ramos, Monteiro et al., 2018). مکانی که واکنش های گازی شدن در آن انجام می شود به عنوان گاز ی‌ساز شناخته می شود. گازیفایر عامل بسیار مهمی است که بر فرآیندها، واکنش ها و محصولات تبدیل به گاز تأثیر می گذارد. به طور کلی، گازی‌کننده‌ها را می‌توان به سه گروه بزرگ تقسیم کرد: گازی‌کننده‌های بستر ثابت (یا گازی‌کننده‌های بستر متحرک)، گازی‌کننده‌های بستر سیال، و گازی‌کننده‌های جریان حباب‌دار (Zhang, Cui et al., 2019). راکتورهای بستر سیال، مناسب ترین راکتورها برای یک فرآیند خوب و کارآمد در نظر گرفته می شوند. معمولا مواد بستر سیال متشکل از سنگ های طبیعی مانند دولومیت و الیوین به دلیل قیمت مناسب بهترین گزینه هستند. در مورد شرایط بهینه، مدل‌های ریاضی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی دوبعدی (CFD) تأیید کردند که دمای تبدیل به گاز تأثیر کلیدی بر ارزش حرارتی گاز سنتز تولید شده دارد. گازی سازی مشترک (همزمان) مواد زائد مختلف با نتایج امیدوارکننده‌ای گزارش شده است. افزودنی های غیر آلی مانند اکسید کلسیم (CaO) برای کاهش CO_2 و افزایش کیفیت گاز سنتز مشاهده شده است . ادغام گازسازی و و گازسازی همزمان در سلول‌های سوختی اکسید جامد (SOFC) یا سیستم‌های تولید همزمان موتور احتراق داخلی (ICE) یک گزینه بسیار امیدوارکننده است و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است (Garcia, Lourinho et al., 2019).

- **فشارزدایی بخار انفجاری[1]**

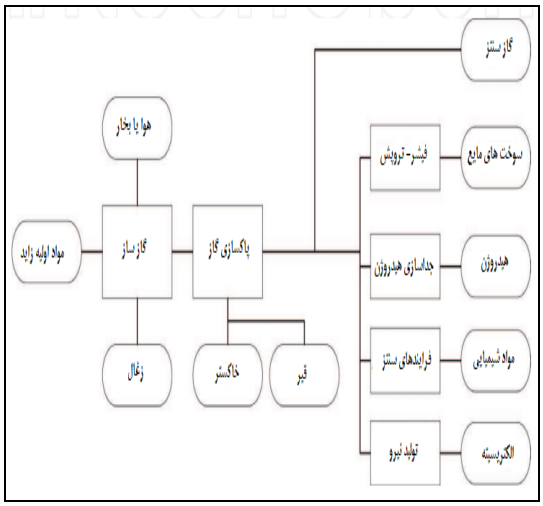
فشارزدایی انفجاری یک فرآیند پیش تصفیه ترموشیمیایی است که با استفاده از بخار و فشار بالا، ساختار سفت و سخت مواد لیگنوسلولزی را مختل می کند. در این روش، زیست توده آسیاب شده با بخار اشباع شده با فشار بالا تصفیه می‌شود و سپس فشار به سرعت کاهش می‌یابد، که باعث می‌شود ماده تحت فشار زدایی انفجاری قرار گیرد (Soccol, Faraco et al., 2019). این فرآیند در سال ۱۹۳۱ توسط میسون [۲۵] ثبت شد، این فرآیند شامل گرم کردن مواد زائد در بخار داغ در دمای ۲۸۵ درجه سلسیوس و فشار ۳/۵ مگاپاسکال به مدت ۲ دقیقه، قبل از افزایش مجدد فشار، این بار به ۷ مگاپاسکال برای ۵ ثانیه است. [۲۶]. این فرآیند باعث اختلال در ساختار ماده، تخریب همی سلولز و تبدیل لیگنین به دلیل دمای بالا می شود، بنابراین هیدرولیز بعدی سلولز را تسهیل می کند. عملیات بخار را می توان در حضور کاتالیزور (اسیدی یا قلیایی) انجام داد (Öhgren, Bura et al., 2007). بسیاری از پارامترها مانند دما، زمان ماند، غلظت کاتالیزور، زمان خیساندن و میزان رطوبت را می توان برای بهبود پیش تصفیه بخار بهینه کرد (Bruni, Jensen et al., 2010). به طور طبیعی، زمان و دما تأثیر عمده ای در اختلال در الیاف تشکیل دهنده زیست توده دارند، به طوری که فرآیند پیش تصفیه به طور بالقوه فقط منجر به ایجاد برخی شیارها در چوب یا تبدیل کلی به خمیر می شود. کاربرد اصلی این فناوری به عنوان پیش تصفیه مواد لیگنوسلولزی است (شکل ۳) که برای در دسترس ساختن بیوپلیمرها برای تصفیه بیشتر از طریق فرآیندهای دیگر مانند تخمیر، هیدرولیز، هضم بی هوازی و چگالش ضروری است. به عنوان مثال، تولید بیوگاز توسط هضم بی هوازی با استفاده از ضایعات لیگنوسلولزی به دلیل ماهیت سرکش و مقاوم (غیر تجزیه پذیری) آن یک چالش بزرگ در نظر گرفته می شود. در این راستا، استفاده از فشارزدایی بخار انفجاری به عنوان نوعی پیش تصفیه برای افزایش تولید بیوگاز ثابت شده است. علاوه بر این، تولید اتانول و تولید گاز سنتز با استفاده از مواد اولیه لیگنوسلولزی نیز گزارش شده است که در صورت جلوگیری از انفجار بخار، به ترتیب با ارزش حرارتی بالاتر و دماهای پایین تر ادامه می‌یابد. یک راه حل امیدوارکننده برای انفجار مداوم بخار توسط یک تیم تحقیقاتی از دانشگاه فناوری چین جنوبی ارائه شده است که امکان افزایش مقیاس فرآیند و ادغام بالقوه آن در پالایشگاه های زیستی نسل دوم را فراهم می کند (Garcia, Lourinho et al., 2019).

- **پیرولیز[2]**

پیرولیز (همچنین به عنوان تجزیه حرارتی شناخته می شود) روشی است که در آن زیست توده در معرض دمای بالا (بین ۵۰۰ درجه سانتی گراد تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد) بدون

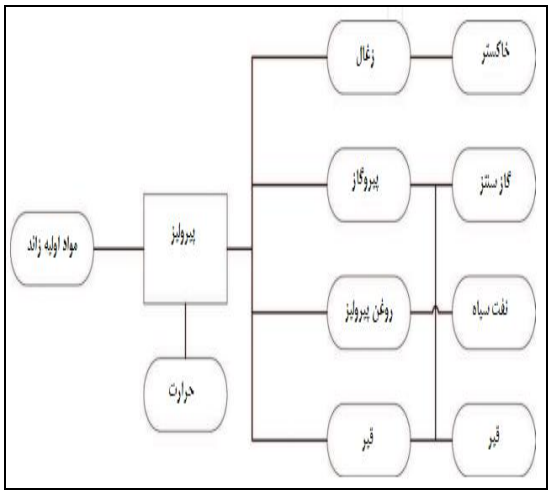
[1]- Explosive steam decompression
[2]- Pyrolysis

اکسیژن عامل اکسید کننده قرار می گیرد (Tyagi, Lee et al., 2019). دستیابی به یک اتمسفر کاملاً بدون اکسیژن عملاً غیرممکن است، بنابراین سیستم های پیرولیتیک با مقادیر استوکیومتری کمتر اکسیژن کار می کنند. از آنجایی که مقداری اکسیژن در هر سیستم پیرولیتیک وجود دارد، همیشه مقدار کمی اکسیداسیون وجود خواهد داشت (Vallero, 2014).



شکل ۳- طرح شماتیک از فناوری رفع فشار بخار انفجاری

پیرولیز فرآیندی است که طی آن یک جامد (یا یک مایع) بدون برهمکنش با اکسیژن یا هر اکسیدان دیگری تحت تخریب حرارتی به مولکول‌های فرار کوچک‌تر قرار می‌گیرد. پیرولیز یک فرآیند ضروری برای احتراق بیشتر سوخت های جامد است. پیرولیز یک ماده معین می تواند محصولات مختلف تجزیه حرارتی را تولید کند که محصولات پیرولیز نامیده می شوند. درک این نکته مهم است که پیرولیز یک تغییر فاز نیست. این یک فرآیند شیمیایی است. به عبارت صحیح تر، این یک فرآیند تجزیه حرارتی است، زیرا تحت گرما رخ می دهد و مولکول های بزرگتر را به مولکول های کوچکتر تجزیه می کند. پیرولیز تحت تأثیر متغیرهای زیادی از جمله نوع بستر، حضور اکسیژن یا سایر مواد شیمیایی، سرعت افزایش دما و غیره قرار می گیرد (Stauffer, Dolan et al., 2008). پیرولیز یک فرآیند تجزیه ترموشیمیایی است که در غیاب کامل اکسیژن و در دمای نسبتاً پایین (۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس) در مقایسه با گازی‌سازی (۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) اتفاق می‌افتد. انواع مختلفی از پیرولیز وجود دارد که هر کدام به تولید سه محصول مختلف کمک می‌کنند: گاز پیرولیز، روغن پیرولیز و زغال سنگ (شکل ۴). سهم نسبی هر محصول به روش پیرولیز اعمال شده، نوع ماده اولیه و دما بستگی دارد. شواهد باستان‌شناسی نشان می‌دهد که در دوران پارینه سنگی میانه، نئاندرتال‌ها برای تولید نوعی قیر به منظور استفاده از آن به عنوان چسب، از تجزیه در اثر حرارت استفاده کرده‌اند. استفاده از این فرآیند در تولید انواع محصولات تا اوایل قرن بیستم در سراسر جهان رواج داشت. امروزه، پیرولیز یک بار دیگر به عنوان یک راه حل جالب برای تولید انرژی، سوخت و مواد شیمیایی با استفاده از پسماندهای محلی در نظر گرفته می شود (Garcia, Lourinho et al., 2019).



شکل ٤: طرح شماتیک از فناوری پیرولیز

مزیت اصلی پیرولیز در بازیافت پسماند ممکن است در تبدیل مواد با چگالی کم به محصولات با چگالی انرژی بالا باشد. به عنوان مثال، پیرولیز به عنوان جایگزینی برای تصفیه مواد زائد پلاستیکی برای تولید روغن مشتق شده از پلاستیک (PDO[1]) و پیروگاز پذیرفته شده است. گزارش شده است که PDO مشابه دیزل (C_{13}-C_{20}) است. با این حال، پردازش اضافی برای مقابله با ترکیبات معطر مورد نیاز است. استفاده از کربنات کلسیم ($CaCO_3$) در پیرولیز کود حیوانی (اسب) به دلیل اثرات کاتالیزوری $CaCO_3$ به عنوان منبع احتمالی CO_2، دمای پایین‌تری را ممکن می‌سازد. پیرولیز همزمان مخلوط پلاستیک‌های مختلف و همچنین استفاده از کاتالیزورها نیز نتایج جالبی در مورد بهره‌وری و کیفیت اجزای PDO به همراه داشته است (Garcia, Lourinho et al., 2019).

- **مایع سازی هیدروترمال یا دپلیمریزاسیون حرارتی[2]**

مایع‌سازی هیدروترمال (HTL[3])، همچنین به عنوان پیرولیز آبدار نیز شناخته می‌شود، یک فرآیند دپلیمریزاسیون ترموشیمیایی در یک راکتور محصور برای تبدیل زیست توده مرطوب به نفت خام و مواد شیمیایی در دمای متوسط و فشار بالا در حضور کاتالیزور و هیدروژن است (Zhang and Chen 2018). گاز و زغال نیز تولید می شود. یک محصول معمولی ممکن است حاوی (از نظر وزن) ۱۰ – ۷۳ ٪ روغن زیستی، ۸ – ۲۰ ٪ گاز و ۰/۲ – ۰/۵ ٪ زغال سنگ باشد. روغن زیستی تولید شده حاوی اکسیژن کمتری نسبت به نفت زیستی تولید شده توسط پیرولیز است. مایع‌سازی هیدروترمال روشی گران‌تر از پیرولیز و گازی شدن است. علاوه بر این، باور بر این است که تعادل انرژی مایع‌سازی

[1]- Plastic-Derived Oil
[2]- Thermal Depolymerization
[3]- Hydrothermal liquefaction

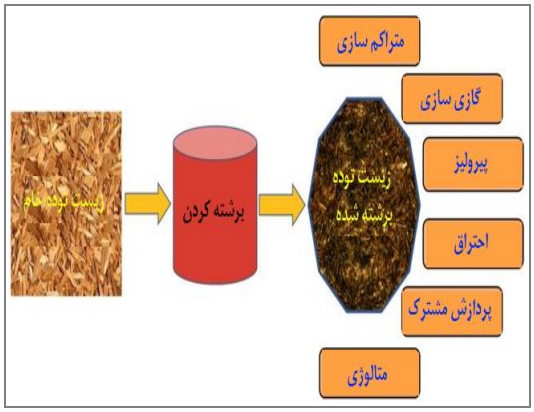
هیدروترمال در صورتی نامطلوب باشد که محتوای آب زیست توده از ۹۰ درصد بیشتر شود (Chisti, 2019). مایع‌سازی هیدروترمال یا دپلیمریزاسیون حرارتی، تبدیل حرارتی مواد زائد جامد به مایع با استفاده از دماهای متوسط (۲۵۰-۳۷۵ درجه سلسیوس) و فشارهای بالا (۴-۲۲ مگاپاسکال) است. مشابه پیرولیز، اما با مواد زائد غوطه‌ور در آب در فشارها و دماهای بالا، این فرآیند منجر به شکستن زنجیره های کربنی طولانی می شود و در نتیجه یک روغن زیستی با ارزش حرارتی خوب ایجاد می شود. به عنوان یک گزینه فنی، این فرآیند نیازی به کاتالیزور ندارد، اما تحقیقات نشان داده است که استفاده از کاتالیزورهای قلیایی امکان تشکیل مواد شیمیایی با ارزش بالا را فراهم می کند. مایع‌سازی هیدروترمال جذاب است زیرا راندمان بیش از ۸۰٪ هنگام تبدیل زیست توده به سوخت و سایر مواد شیمیایی با ارزش متداول است. این فناوری پتانسیل بسیار زیادی ، به ویژه برای تولید سوخت های زیستی و مواد خام برای پردازش های شیمیایی بیشتر دارد (Toor, Rosendahl et al., 2011). مفهوم مایع‌سازی هیدروترمال برای اولین بار در دهه ۱۹۲۰ مورد بررسی قرار گرفت و در دهه ۱۹۵۰ توسط Heinemann H. توسعه یافت. با این حال، تنها پس از بحران نفت در دهه ۱۹۷۰، اولین تلاش‌ها برای بهره‌برداری از این فناوری به نتیجه رسید، که در نهایت این مفهوم در مقیاس آزمایشی با ساخت تأسیسات آزمایشی مایع‌سازی زیست توده در اورگان، ایالات متحده آمریکا به اثبات رسید. اخیراً تحقیقات در مورد این فناوری بر روی کاتالیزورهای جدید و توسعه روش های جدید برای تبدیل روغن های زیستی تولید شده به محصولات با ارزش متمرکز شده است. در عمل، مایع سازی هیدروترمال به این دلیل ارزش دارد که تبدیل سریع زیست توده پسماند به نفت زیستی را فراهم می کند و از هزینه‌های انرژی بالای خشک کردن جلوگیری می کند. اکثر مطالعات نشان داده اند که بدون نتیجه گیری کلی در مورد اثرات زمان واکنش و میزان رطوبت، دماهای بین ۲۵۰ تا ۳۷۰ درجه سلسیوس برای تولید روغن زیستی بهینه هستند، مایع سازی هیدروترمال همزمان یک مسیر جالب است و باید در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد. افزودن کربنات پتاسیم (K_2CO_3) و همچنین استفاده مجدد از مایع برای افزایش ارزش حرارتی و بهره وری گزارش شده است. افزودن حلال‌ها نیز برای بهبود فرآیند مشاهده شده است ، در حالی که افزودن کاتالیزورهای فلزی منجر به اکسیژن‌زدایی و گوگرد زدایی از روغن زیستی می‌شود (Elliott 2007; Guo, Yeh et al., 2015).

- **تروفیشن (برشته کردن)** [1]

تروفیشن یک فرآیند ترموشیمیایی است که ا گاهی اوقات پیرولیز ملایم نیز نامیده می شود زیرا مانند تجزیه در اثر حرارت در اتمسفر بی اثر یا احیا کننده عمل می کند، یعنی در غیاب اکسیژن، اما در دمای ۲۰۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد، که کمتر از دمای پیرولیز است. فشار عملیاتی معمولاً فشار اتمسفر است. به طور کلی، هدف تروفیشن با پیرولیز متفاوت است، زیرا این روش برای کاهش محتوای آب و مواد فرار از زیست توده، و در نتیجه بهبود برخی از خواص سوخت از جمله چگالی انرژی بالاتر، رفتار آبگریز، حذف فعالیت بیولوژیکی، قابلیت آسیاب کردن آسانتر، ترکیب همگن تر و غیره استفاده می شود (Limousy, Jeguirim et al., 2017; Jeguirim and Khiari 2022). در طی فرایند تروفیشن، ترکیبات لیگنوسلولزی – همی سلولز، سلولز و لیگنین – در معرض تجزیه قرار می‌گیرند که به طور کلی منجر به خروج CO_2 و H_2O می‌شود و از این رو کاهش محتوای H و O و افزایش محتوای C در باقی‌مانده‌ها مشاهده می‌شود. باقی مانده در میان ترکیبات لیگنوسلولزی، همی سلولز یکی از ترکیباتی است که بیشتر در معرض تجزیه در حین فرایند تروفیشن قرار می گیرد (Limousy, Jeguirim et al., 2017; Jeguirim and Khiari 2022). تاثیر فرایند تروفیشن بر خصوصیات زیست توده در شکل ۵ نشان داده شده است (Chen, Peng et al. 2015, Sarker, Nanda et al. 2021). برشته کردن شکلی از عملیات حرارتی است که بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس در غیاب اکسیژن انجام می شود. با افزایش دما، رطوبت و مواد فرار اضافی به تدریج آزاد می شوند و پلیمرهای زیستی مانند همی سلولز، سلولز و لیگنیت بسته به شرایط فرآیند تا حدی تجزیه می شوند. به عنوان مثال، در دماهای معتدل (۲۳۵-۲۷۵ درجه سلسیوس)، تجزیه همی سلولز تسریع می‌شود، و انتشار مواد فرار تشدید می‌شود، در حالی که سلولز فقط تا حدی مصرف می شود. به طور متوسط، فرآیند منجر به تلفات جرم و کاهش ارزش حرارتی (به ترتیب ۲۰٪ و ۱۰٪) می‌شود، اما ترکیب مواد زائد همگن‌تری را ایجاد می کند و منجر به چگالی انرژی بالاتر می‌شود. برخی از زیست توده ها دارای ویژگی‌هایی هستند که مانع استفاده از آنها به عنوان مواد اولیه انرژی می‌شود. استفاده از این فرآیند به عنوان پیش تصفیه، امکان استفاده از طیف گسترده‌ای از مواد زائد را در سایر فناوری های WtE فراهم می‌کند. بنابراین، محصول اصلی خشک کردن، مواد زائدی است با خصوصیات بهبود یافته در مورد مصرف انرژی آن است. بیش از ۱۵۰ تاسیسات خشک کردن در سراسر جهان با توان ۵۰ تا ۷۰۰ مگاوات، احتراق همزمان زیست توده خشک شده، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را با موفقیت آزمایش کرده-اند. انتظار می‌رود که زیست توده برشته شده می‌تواند ۵ تا ۱۰ درصد از کاربردهای صنعتی در اروپا را به خود اختصاص دهد (Proskurina, Heinimö et al., 2017). با این حال، بازار مواد زائد خشک شده هنوز بسیار جدید است و اطلاعات کافی در رابطه با استفاده واقعی، اجرا و تکامل این فناوری وجود ندارد.کاربرد فناوری تروفیشن در شکل ۶ نشان داده شده است (Sarker, Nanda et al., 2021).

[1]- Troffecation

شکل ۵- تاثیر فرایند تروفیشن بر خصوصیات زیست توده



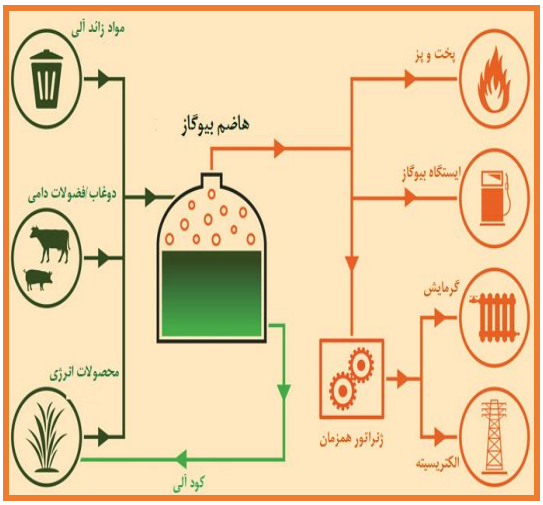
شکل ٦- کاربرد فناوری تروفیشن و زیست توده برشته شده

در میان محققین، برشته کردن به عنوان یک پیش تصفیه عالی برای بهبود ویژگی‌های بازیافت انرژی انواع مختلف مواد زائد ایجاد کننده محصولاتی با نسبت اکسیژن به کربن پایین و ارزش حرارتی بالا برای کاربردهای گازی‌سازی همزمان و احتراق همزمان در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، برشته کردن ضایعات انواع مختلف تفاله و هرس منجر به نتایج بسیار امیدوارکننده با افزایش ارزش حرارتی به سطوح نزدیک به زغال سنگ شد. نتایج جالب دیگری توسط محققان در خصوص استفاده از این فرایند [۵۰] در رابطه با مواد زائد جامد شهری با ماهیت بسیار ناهمگن و همراه با محتوای رطوبت بالا گزارش شده است در حالی که کاربرد چنین مواد زائدی در فرآیندهای WTE و WTL بدون استفاده از فرایند فوق چالش برانگیز می‌باشد. گزارش شده است اکثر مطالعات همبستگی مثبتی بین ارزش حرارتی و دمای برشته کردن را گزارش کرده‌اند (Garcia, Lourinho et al., 2019).

❑ فرایندهای بیولوژیکی تولید انرژی و سوخت زیستی از پسماند

• هضم بی هوازی

هضم بی هوازی (AD[1]) شامل تبدیل مواد آلی زیست تخریب پذیر در غیاب اکسیژن است که در آن بیوگاز غنی از متان تولید می شود. به طور معمول، بیوگاز حاصل از ۵۰-۷۵٪ CH_4، ۲۵-۵۰٪ CO_2 و ۱-۱۵٪ از گازهای دیگر مانند H_2O، NH_3 و H_2S تشکیل شده است. یکی دیگر از محصولات جانبی هضم بی هوازی، هضم است که یک کود زیستی آلی عالی است. تقریباً همه انواع مواد آلی پتانسیل هضم بی هوازی برای تولید بیوگاز را دارند. رایج ترین پسماندهای آلی مورد استفاده در AD عبارتند از کشاورزی، صنایع دامپروری، صنایع کشاورزی و پسماندهای جامد شهری و فاضلاب. مواد چوبی کمتر مناسب هستند زیرا حاوی نسبت بالایی از زغال سنگ هستند و تجزیه بیولوژیکی آن را بسیار دشوار می کند . در شکل ۸ یک طرح نمونه وار از فرایند هضم بیهوازی مواد زائد غذایی نشان داده شده است (Horan, Yaser et al., 2018).



شکل ۷- طرح نمونه از فرایند هضم بیهوازی مواد زائد آلی

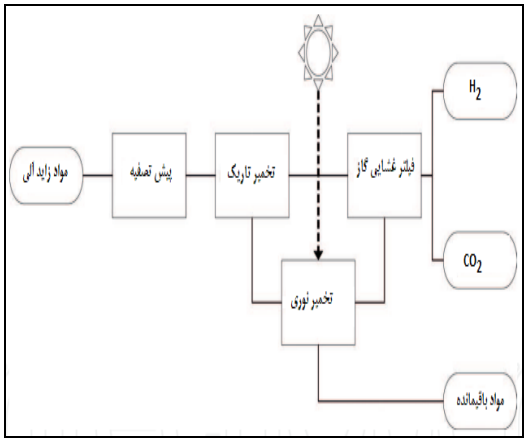
به عنوان یک فناوری، AD در حال حاضر به خوبی تکامل و توسعه یافته است. از سال ۲۰۰۹، تعداد نیروگاه های بیوگاز در اروپا با رشد تولید بیومتان مطابق با توسعه بخش، به شدت افزایش یافته است. تنها در سال ۲۰۱۶، تولید انرژی حاصل از بیومتان به میزان ۴۹۷۱ گیگاوات ساعت (+۴۰ درصد) در کشورهای اروپایی بررسی شده افزایش یافت. بنابراین، کلید تحقیقات آینده، بهینه سازی پارامترهای فرآیندی است که بر کارایی تأثیر می گذارد. برای مثال، تغییر دما بر فعالیت میکروبی و نرخ رشد تأثیر می گذارد. دمای هضم بالاتر، به عنوان مثال در محدوده گرمادوست، نشان داده شده است که منجر به بهره وری بالاتر بیوگاز می شود، اما هضم گرما دوست به دلیل هزینه های انرژی، سرمایه گذاری بالاتری را نشان می دهد. از سوی دیگر، هضم بسترهای ساده اغلب منجر به عدم تعادل مواد مغذی می شود که بر پایداری فرآیند تأثیر می گذارد. بنابراین، بهینه‌سازی نسبت C/N توسط هضم همزمان به طور گسترده با نتایج خوب با استفاده از هم افزایی بین بسترهای مختلف آزمایش شده است. این استراتژی نشان دهنده اقتصادی ترین راه برای بهبود بهره وری فرآیند امروزه است. استفاده از مراحل چندگانه در AD نیز به عنوان راه حل جالبی برای دستیابی به بهترین استفاده از بسترهای مختلف مشاهده شده است. ادغام هضم بی

[1]- Anaerobic digestion

هوازی با کشت ریزجلبک مزایای بالقوه ای را ارائه می دهد. از نقطه نظر اقتصادی، هزینه ها را می توان با استفاده از مواد هضم شده از AD به عنوان منبع مواد مغذی برای رشد جلبک به میزان قابل توجهی کاهش داد. با این حال، باید بر مانع متعدد قبل از افزایش مقیاس غلبه شود. مانع اصلی شناسایی شده در تحقیق بررسی شده، نیاز به یافتن یک سویه ریزجلبک قوی با قابلیت اتصال با کربن آلی و معدنی و تحمل pH شدید بود (Ho, Nagarajan et al., 2018; Maragkaki, Vasileiadis et al., 2018).

- **تخمیر[1]**

تخمیر یک فرآیند متابولیک بی هوازی است که در آن میکروارگانیسم ها (باکتری ها، مخمرها) کربوهیدرات ها را به اسیدهای چرب، الکل ها و محصولات گازی مانند H2 و CO2 تبدیل می کنند (شکل ۹). رایج ترین محصولات صنعتی حاصل از تخمیر عبارتند از اتانول، اسید استیک و اسید سیتریک (۲-هیدروکسی پروپان-۱،۲،۳-تری کربوکسیلیک اسید). تبدیل قندها به اتانول شناخته شده ترین شکل تخمیر است که نوشیدنی های الکلی مانند شراب، آبجو و سیب را تولید می کند. جالب اینجاست که همین تخمیر در تولید نان، ماست و سایر غذاهای تخمیر شده با تشکیل اسید لاکتیک (۲-هیدروکسی پروپانوئیک اسید) اتفاق می افتد. علاوه بر این، پیشرفت‌های قابل توجهی در تولید بیواتانول، بیوبوتانول (بوتان-۱-اول)، و هیدروژن زیستی (هیدروژن مولکولی)، در میان سایر مواد شیمیایی با ارزش بالا صورت گرفته است. تخمیر مداوم گاز سنتز با استفاده از راکتورهای قطره‌ای بستر ثابت برای تولید اتانول به عنوان یک مفهوم معتبر با بالاترین غلظت اتانول (۱۳,۲ گرم در لیتر) به‌دست‌آمده در طی تخمیر مداوم گاز سنتز با سرعت رقت ۰,۰۱۲ ساعت در ۱ ثابت شده است. با این حال، علیرغم اینکه یک فناوری امیدوارکننده است، این فرآیند در توسعه خود در مقیاس صنعتی با مشکلاتی روبرو شده است. علاوه بر بیوراکتورهای بستر ثابت، سایر تلاش‌های مرتبط با طراحی راکتور بر روی غشاهای همراه با تشکیل بیوفیلم‌ها به دلیل افزایش انتقال جرم متمرکز شده‌اند. مطالعات بر روی تولید بیو هیدروژن بر روی بیوفوتولیز آب با استفاده از جلبک ها و سیانوباکتری ها، تجزیه نوری ترکیبات آلی توسط باکتری های فتوسنتزی، و تخمیر تاریک ترکیبات آلی با بی هوازی ها متمرکز شده است. برای تخمیر تاریک، باید به بازدارنده‌هایی مانند بیش از حد سوبسترا، ریز مغذی‌ها، درشت مغذی‌ها و یون‌های فلزی، دماهای بالا، سطوح pH اسیدی و رقابت با سایر میکروارگانیسم‌ها توجه ویژه‌ای شود (Rai and Singh 2016).



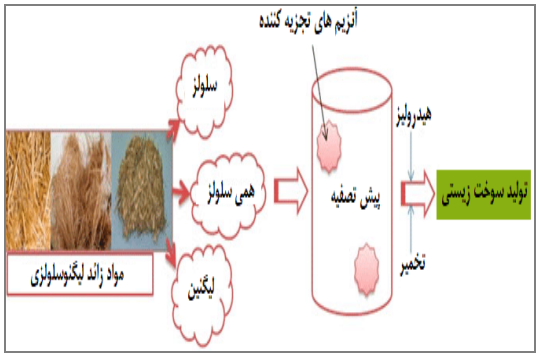
شکل ۹- طرح نمونه از فناوری تخمیر

- **تصفیه آنزیمی[2]**

آنزیم ها کاتالیزورهای بیولوژیکی ماکرومولکولی هستند که واکنش های شیمیایی را تسریع می کنند. در سال ۱۸۹۷، ادوارد بوشنر به آنزیم های استخراج شده از مخمرهای رشد یافته در آزمایشگاه خود برای تخمیر اتانول متوسل شد، کار مهمی که برای آن جایزه نوبل شیمی را در سال ۱۹۰۷ دریافت کرد. برای بازیابی انرژی و تولید سوخت زیستی امروزه، تقریباً همه انواع آنزیم‌های تجاری موجود از طریق تخمیر تولید می‌شوند و تقریباً در همه جنبه‌های زندگی ما، از صنعت داروسازی گرفته تا مواد شوینده لباس‌شویی، نقش دارند. در سال ۲۰۱۶، یک واحد صنعتی شامل یک پیش تصفیه آنزیمی در چارچوب بازیابی انرژی از MSW شروع به کار کرد. به طور خاص، آنزیم ها کسری از مواد آلی موجود در MSW را تجزیه می کنند تا بتوان آنها را به راحتی به صورت بی هوازی هضم کرد. این تاسیسات در نورثویچ انگلستان واقع شده است و ۵ مگاوات با مصرف ۱۵ میلی گرم در ساعت MSW تولید می کند. یکی دیگر از کاربردهای تجاری با چشم انداز خوب آینده، ساکاره سازی آنزیمی است که می تواند برای تولید بیواتانول با هزینه کم استفاده شود. به عنوان مثال، برخی از مطالعات در مورد تولید بیواتانول از بامبو، نشان می‌دهد که افزایش مقدار آنزیم باعث بهبود کمی در فرآیند می‌شود و نیاز به بهینه‌سازی بسته به پسماندهایی که باید تبدیل شوند را برجسته می‌کند. آزمایش‌های دیگر بر بهبود فرآیند از طریق پیش تصفیه نمک متمرکز شده‌اند. به عنوان مثال، افزودن نمک های معدنی برای بهبود کاهش عملکرد قند ضایعات برگ نیشکر و ساقه خردل و کاه گزارش شده است (Garcia, Lourinho et al., 2019). نقش پیش تصفیه آنزیمی برای تولید سوخت زیستی در شکل ۱۰ نشان داده شده است (Sadia, Bakhtawar et al., 2021).

[1]- Fermentation

[2]- Enzyme treatment



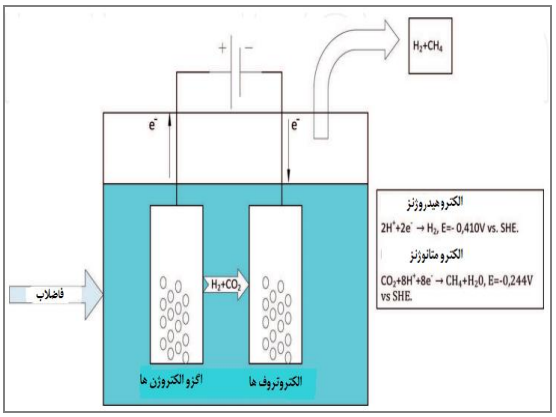
شکل ۱۰- نقش پیش تصفیه آنزیمی برای تولید سوخت زیستی

- **الکترولیز میکروبی**

الکترولیز میکروبی یک تبدیل بیوالکتروشیمیایی است که در آن هیدروژن یا متان از پسماندها و فاضلاب های مختلف تولید می شود. سلول‌های الکترولیز میکروبی (MEC[1]) از فعالیت متابولیکی باکتری‌های اگزوالکترونیک برای کاتالیز کردن واکنش‌های اسیداسیون و احیا و ترویج جریان الکترون‌ها بین الکترودها استفاده می‌کنند. به طور خاص، باکتری ها بسترهای زیست تخریب پذیر را در آند تبدیل می کنند و الکترون ها و پروتون ها را آزاد می کنند (شکل ۱۱). سپس الکترون ها به کاتد (محل تولید هیدروژن) منتقل می شوند و جریان الکتریکی با مقادیر پتانسیل الکتریکی (۰/۲- V ۰/۸) کمتر از الکترولیز سنتی (۱/۸-۳/۵ V) القا می کنند (Kadier, Simayi et al., 2016). همچنین MEC به عنوان یک روش سازگار با محیط زیست برای تولید بیوهیدروژن تمیز از انواع مواد آلی پسماند و برای انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر در نظر گرفته می شود. این فناوری شامل اکسیداسیون مواد آلی در آند و کاهش پروتون در کاتد تحت منبع ولتاژ خارجی اسمی است. با این حال، راندمان تولید بیوهیدروژن و هزینه های عملیاتی MEC هنوز به بهینه سازی بیشتر برای پیاده سازی در برنامه های کاربردی در مقیاس بزرگ نیاز دارد (Gautam, Tompe et al., 2021). سلول های الکترولیز میکروبی پتانسیل تبدیل شدن به یکی از مهم ترین فناوری های WtE را دارند. با این حال، مواد الکترود هنوز پرهزینه هستند و پیشرفت‌های بیشتری مورد نیاز است. در این راستا، به نظر می رسد استفاده از الکترودهای مبتنی بر زغال زیستی یک مسیر تحقیقاتی جالب را تشکیل می دهد. در حال حاضر، به نظر می رسد اتصال با سایر فناوری ها برای تولید انرژی، کاربرد اصلی آن باشد. به عنوان مثال، استفاده از الکترولیز میکروبی به عنوان یک پیش تصفیه برای AD، اخیراً با نتایج جالبی مورد بررسی قرار گرفته است. در یک مطالعه متمرکز بر ارزش گذاری FW[2] بسیار غلیظ ، MEC منجر به تسریع نرخ تولید و تثبیت متان شد. به عنوان مثالی دیگر، پس پردازش پساب حاصل از مایع‌سازی هیدروترمال برای هیدروژن بازیافتی نیز با نتایج مؤثری نشان داده شده است.

[1]- Microbial electrolysis cells
[2]- Food waste

به عنوان یک فناوری، MEC هنوز در مرحله اولیه توسعه است و با استفاده از مواد الکترود جدید و پیکربندی‌های جدید راکتور، پیشرفت بیشتری انتظار می‌رود (Shen, Liu et al., 2016; Shen, Jiang et al., 2018).



شکل ۱۱- طرح نمونه از فناوری الکترولیز میکروبی

فرایندهای شیمیایی تولید انرژی و سوخت زیستی از پسماند

- **هیدرولیز[3]**

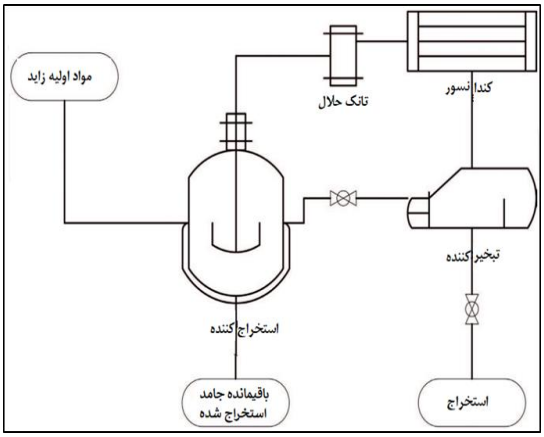
هیدرولیز احتمالاً رایج ترین واکنش شیمیایی در فناوری WtE و WtL متعددی است. هیدرولیز واکنش شیمیایی است که در آن افزودن یک مولکول آب، پیوند شیمیایی مولکول دیگر را می شکند و مولکول های حاصل به یون های H+ و OH- متصل می شوند. در سال ۱۸۱۹، هانری براکونوت کشف کرد که می تواند از سلولز از طریق هیدرولیز با اسید سولفوریک، قند تولید کند. سپس این قند هیدرولیز شده می تواند برای تولید اتانول پردازش و تخمیر شود. تولید اتانول از طریق هیدرولیز به طور گسترده در آغاز قرن بیستم با حداکثر بازده ۱۹۰ لیتر در هر میلی‌گرم زیست توده آغاز شد. در اتحاد جماهیر شوروی سابق در طول دهه ۱۹۳۰، رشد صنعتی در آن زمان نیاز به توسعه فرآیندهای تولید اتانول داشت که از منابع غذایی استفاده نمی کرد. در سال ۱۹۳۴، شش راکتور آزمایشی با هدف بهینه‌سازی فناوری‌های مختلف هیدرولیز، نه تنها برای تولید اتانول، بلکه محصولات دیگری مانند زایلیتول و فورفورال ساخته شد. پس از جنگ جهانی اول، این فرآیند دیگر از نظر اقتصادی در برابر روش‌های مرسوم‌تر مقرون به صرفه نبود. با پیشرفت های دو دهه اخیر، هیدرولیز آنزیمی امیدوارکننده ترین کاربرد در مورد تکنیک های هیدرولیز به نظر می رسد (Garcia, Lourinho et al., 2019).

- **استخراج با حلال[4]**

استخراج با حلال یک فناوری نسبتاً مدرن است که در استخراج محصولات از بسترهای آن استفاده می شود (شکل ۱۲). با انتخاب حلالی که به بهترین وجه محصول مورد نظر را حل می کند، این فرآیند معمولاً در مقایسه با سایر روش

[3]- Hydrolysis
[4]- Solvent extraction

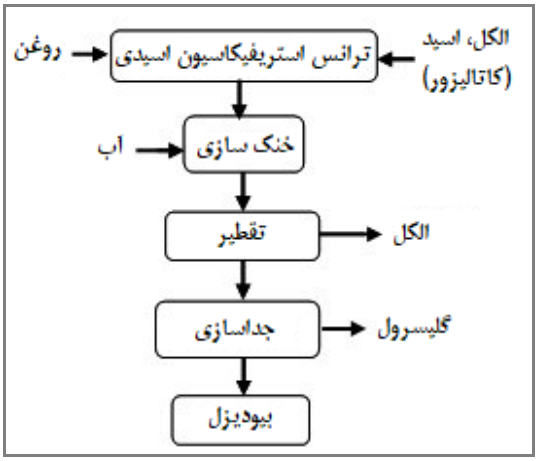
ها بازده بالاتری را به همراه دارد. جداسازی سریع و کارآمد است و بیشتر حلال قابل استفاده مجدد است. استخراج با حلال طیف گسترده ای از کاربردها در صنایع شیمیایی برای بازیابی ترکیبات خالص از جمله دارویی، زیست پزشکی، شیمی تحلیلی، تصفیه فاضلاب و همچنین در تحقیقات انجام می شود. حلال ها در این صنایع در سیستم های واکنش و مراحل پردازش استفاده می شوند زیرا نقش مهمی در عملکرد زیست محیطی، اقتصادی و امکان سنجی فرآیند دارند. به طور عمده، صنعت فرآیند شامل استفاده از حلال های سبز به دلیل نگرانی های آلودگی زیست محیطی است، زیرا آنها نسبت به حلال های آلی یا آبی مزیت بیشتری دارند و جداسازی محصول را بهبود می بخشند. رایج ترین حلال های صنعتی مورد استفاده مایعات یونی، حلال های یوتکتیک عمیق، دی اکسید کربن فوق بحرانی، پلیمرهای مایع و حلال های منبسط شده با گاز هستند (Yusoff, Ayoub et al., 2021). استخراج روغن از طریق این فناوری یک کاربرد رایج در صنعت است که معمولاً پس از استخراج مکانیکی استفاده می شود. هگزان پر مصرف ترین حلال است، اما اتانول و ایزوپروپانول نیز به عنوان گزینه های جایگزین پیشنهاد شده اند. استخراج کننده سوکسله به دلیل سادگی کار، ایمنی نسبی و سهولت تکرار نتایج در مقیاس صنعتی، اغلب روش ارجح برای استخراج لیپید است. بر اساس تحقیقات، حلال‌های آلی مانند کلروفرم، اتانول و هگزان بهترین نتایج را هنگام انجام استخراج لیپید از ریزجلبک‌ها ایجاد می‌کنند. همچنین مشاهده شد که مخلوط‌های حلال نتایج بهتری نسبت به استخراج‌های تک حلالی دارند، با مخلوط ۵۰/۵۰ کلروفرم و اتانول که منجر به ۱۱/۷۶ درصد عصاره‌های لیپیدی می‌شود. به عنوان یک تک حلال، کلروفرم با ۱۰/۷۸ درصد بیشترین مقدار لیپیدهای استخراج شده را با ۳ ساعت نشان داد که بهترین بازده استخراج را نشان می دهد. استخراج با حلال همچنین دارای پتانسیل ادغام با فرآیندهای دیگر مانند استخراج فوق بحرانی یا پیرولیز به منظور تولید مواد شیمیایی با ارزش بالاتر از روغن های زیستی است (Ramluckan, Moodley et al., 2014; Schievano, Adani et al., 2015).



شکل ۱۲- طرح نمونه از فناوری استخراج حلال

- **ترانس استریفیکاسیون[1]**

ترانس استریفیکاسیون فرآیند اصلی مورد استفاده در تولید بیودیزل است که در آن روغن‌های گیاهی با واکنش با یک الکل و کاتالیزورها (اسیدها، قلیایی‌ها و آنزیم‌ها) با گلیسرول به عنوان تنها محصول جانبی، به متیل یا اتیل استر تبدیل می‌شوند. تولید بیودیزل به طور فزاینده ای به عنوان یک ابزار کاهش کربن در نظر گرفته می شود و اهمیت فزاینده ای در ارتقای پایداری در کشورهای اروپایی دارد. برای مثال، از اول ژانویه ۲۰۱۰، تمام سوخت های دیزل تجاری فروخته شده در پرتغال دارای ۷ درصد بیودیزل هستند. تولید بیودیزل به دلیل استفاده، در دسترس بودن و هزینه مواد خام و همچنین انتشار گازهای گلخانه ای و رقابت غذایی موضوعی بحث برانگیز است. در این زمینه، استفاده از روغن‌های پسماند و محصولات غیرغذایی بهترین گزینه برای تولید گسترده بیودیزل در آینده به نظر می‌رسد (Hajjari, Tabatabaei et al., 2017). فرایند تولید بیودیزل بوسیله ترانس استریفیکاسیون اسیدی در شکل ۱۳ نشان داده شده است (Montcho Papin, Christian et al., 2018)



شکل ۱۳- فرآیند تولید بیودیزل بوسیله ترانس استریفیکاسیون اسید

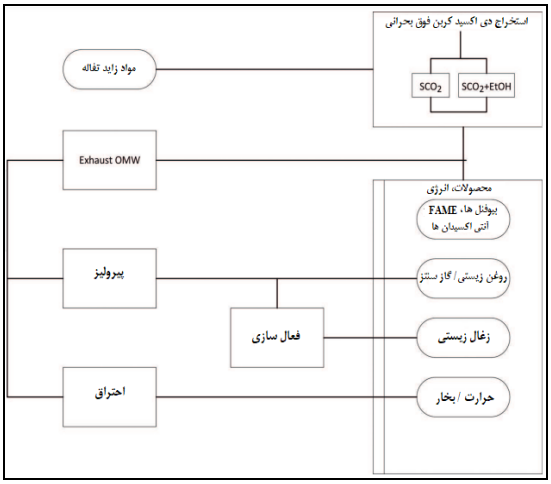
در اروپا، تخمین زده می‌شود که سالانه حدود ۴ میلیون میلی‌گرم ضایعات روغن پخت و پز جمع‌آوری می‌شود که هفت برابر بیشتر از مقدار جمع‌آوری‌شده فعلی است. این زنجیره جمع آوری توسعه نیافته منجر به واردات بی سابقه در ۸ ماهه اول سال ۲۰۱۸ شد و بیش از ۲۳۵۰۰۰ میلی گرم روغن آشپزی زائد از چین وارد اتحادیه اروپا شد. بنابراین بازار بیودیزل نشانه‌هایی از کاهش سرعت را نشان نمی‌دهد. اگرچه بیودیزل در حال حاضر تکامل یافته و از نظر تجاری به خوبی تثبیت شده است، بیودیزل هنوز به تحقیق و توسعه زیادی برای دستیابی به پیشرفت های قابل توجه در تولید خود نیاز دارد (Koutsouki, Tegou et al., 2015; Ishak, Sairi et al., 2017). در این راستا، ادامه علاقه به استفاده از بیودیزل به عنوان سوخت جایگزین منجر

[1]- Transesterification

به افزایش تلاش ها برای توسعه نسل جدیدی از سوخت های زیستی شده است. کاتالیزورهای ناهمگن به طور فزاینده‌ای مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، زیرا آنها بهبودهای فرآیندی را نسبت به تولید تجاری کاتالیز شده همگن با استفاده از پایه‌های مایع ارائه می‌دهند. با جزئیات بیشتر، استفاده از کاتالیزور جامد جداسازی پس از فرآیند و تصفیه سوخت را به همراه سنتز مداوم بیودیزل تسهیل می کند. استفاده روزافزون از روغن های آشپزی با عیار پایین برای کاتالیزورهای ناهمگن موجود چالشی باقی می ماند زیرا غلظت بالای ناخالصی ها (اسید، رطوبت و فلزات سنگین) باعث غیرفعال شدن سریع جریان می شود و نیاز به تصفیه دارد. بنابراین، توسعه فرمول‌های کاتالیزوری قوی‌تر و متحمل به چنین اجزایی یک ضرورت است(Lee, Bennett et al., 2014). سیمان اخیراً در ترانس استری کردن پونگامیا پیناتا و روغن آفتابگردان با نرخ تبدیل کمی (۷۶ درصد) آزمایش شد، اما تحقیقات باید در سال‌های آینده ادامه یابد. از نظر کوپلینگ فرآیند، ترکیب بیودیزل با روغن پیرولیز حاصل از ضایعات لیگنوسلولزی یک مسیر جذاب به عنوان جایگزینی برای سوخت دیزل است. ریز جلبک ها نیز به عنوان یک جایگزین خوراکی جذاب برای کاهش هزینه ها در استخراج و تبدیل این سوخت تجدید پذیر در نظر گرفته می شوند (Das and Sharma 2018; Kumar, Singh et al., 2018).

- **تبدیل فوق بحرانی[1]**

تبدیل فوق بحرانی تکنیک جدیدی است که از سیالات با دمای بالا و فشار بالا، بالاتر از نقطه بحرانی خود، برای دستیابی به تبدیل مواد زائد استفاده می کند. در مقایسه با فناوری‌های WtE و WtL معمولی، این روش ممکن است پیش تیمارهای خشک کردن یا کم‌آبی را نادیده بگیرد، دمای واکنش را کاهش دهد، زمان واکنش را کوتاه کند و بازده محصول را افزایش دهد. در دهه های اخیر، تبدیل فوق بحرانی نه تنها برای استخراج شیمیایی، بلکه در تبدیل شیمیایی با تکرار فرآیندهایی مانند استریفیکاسیون، گازی شدن، هیدرولیز و موارد دیگر مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۱۴). مطالعات با زیست توده واقعی و در مقیاس های بزرگتر وجود ندارد، اما تحقیقات بررسی شده به طور کلی نشان می دهد که، برای مثال، تبدیل به گاز فوق بحرانی در هر دو پالایشگاه زیستی و تولید همزمان پتانسیل بسیار زیادی دارد. به عنوان مثال، گازی شدن آب فوق بحرانی فاضلاب کارخانه روغن زیتون، اخیراً با انواع مختلف کاتالیزور قلیایی مورد بررسی قرار گرفته است (Casademont, García-Jarana et al., 2018). آزمایش‌ها ثابت کردند که افزایش غلظت کاتالیزور، عملکرد هیدروژن را تا حداکثر ۷۶/۷۳ مول هیدروژن در هر کیلوگرم در شرایط خاص بهبود می‌بخشد. استخراج با دی اکسید کربن فوق بحرانی برای تولید بیودیزل فرآیند دیگری است که مورد بررسی قرار گرفته است (Fernández, Fiori et al., 2015). در مطالعه نمونه بررسی شده، بهترین بهره وری ۰/۳۱۲ کیلوگرم روغن به ازای هر کیلوگرم دانهدر فشار ۵۰۰ بار و۴۰ درجه سلسیوس بود. مشاهده شد که محتوای اسیدهای چرب با افزایش فشار کاهش می یابد. در واقع استخراج اسیدهای چرب و ترانس استریفیکاسیون در یک مرحله یکی از بزرگترین پتانسیل‌های این فناوری محسوب می‌شود (Reddy, Muppaneni et al., 2014). Karki و همکاران در سال ۲۰۱۷ ویژگی‌های تجزیه ضایعات روغن‌های نباتی را با استفاده از الکل‌های فوق بحرانی (اتانول و متانول) مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که ترانس استریفیکاسیون فوق بحرانی منجر به بازده استر بیشتر از ۹۵ درصد با ترکیب غیر استری و گلیسرول کمتر از ۵ درصد شد (Karki, Sanjel et al., 2017).



شکل ۱۴- طرح نمونه از فناوری تبدیل فوق بحرانی

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش مروری امکان استفاده از باقیمانده پسماندها پس از پردازش به عنوان منابع تجدیدپذیر زیستی فراوان وکم هزینه در پالایشگاه های زیستی پسماند در آینده مورد بررسی قرار گرفت. جریان‌های پسماند موجود دارای ترکیب پیچیده و متنوعی با توجه به منبع آن هستند که به پلتفرم‌های لجستیک جدیدی از طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری نیاز دارند. با فرسودگی اقتصاد خطی «جمع‌آوری و دفع»، روش‌های جدید مدیریت پسماند در دراز مدت اجتناب‌ناپذیر است. به این ترتیب، پالایشگاه‌های زیستی مواد زائد که انرژی سبز تولید می‌کنند و محصولات مجازی با ارزش بالا و مواد زائد صفر (بدون مواد زائد) در رویکرد «حلقه بسته» و «بازیافت بهینه»، تولید می‌کنند، «محل‌های دفن» آینده هستند. انتظار می رود که آنها در وارد کردن مدیریت پسماند پایدار به دنیای واقعی که اجازه رشد اقتصادی متحول کننده را تحت مفهوم اقتصاد چرخشی می‌دهد، بسیار مهم و حیاتی باشند. با این حال، از فناوری‌های بررسی شده، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیندهای WtL و WtE منفرد تقریباً همیشه در قلمرو خود محدود هستند و چندین برابر محصولات

[1]- Supercritical conversion

ناخواسته تولید می‌کنند. در این راستا، فرایند گازی‌سازی تا حد زیادی یک فناوری با پتانسیل و گستردگی بیشتر در کاربردهای منفرد محسوب می‌شود. با این وجود، حتی این فرآیند دارای اشکالاتی مانند طراحی راکتور، سیستم تغذیه، و تولید قیر است که نیاز به پس تصفیه پرهزینه و/یا پیشرفت‌های فنی بیشتر دارد. در مقابل، ترکیب چندین فرآیند WtE و WtL در یک پالایشگاه زیستی مواد زائد یکپارچه امکان کاهش و حذف اشکالات هر فرآیند را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، در گازی‌سازی، برخی از مواد ناخواسته تولید شده ممکن است با پردازش شیمیایی بعدی مورد استفاده و ارزش گذاری قرار گیرند، و حتی گاز سنتز نیز می تواند ارتقا یابد. این هرم جدید ارزش‌گذاری مواد زائد، فرصت‌هایی را برای فناوری‌های خاص مانند فشارزدایی انفجاری و خشک کردن ایجاد می‌کند تا با تقویت سایر فناوری‌هایی که در یک رویکرد یکپارچه به خوبی تثبیت شده‌اند، به کاربرد عملی تبدیل شوند. تحقیقات آتی در درجه اول باید بر ایجاد سلسله مراتبی از فرآیندها برای تولید محصولات با بالاترین ارزش تمرکز کند و سپس به تدریج به سمت محصولات کم هزینه و تولید انرژی پیشرفت کند. با این حال، برای اینکه این چشم انداز به واقعیت تبدیل شود، تلاش فزاینده ای از سوی محققان با حمایت مداوم و پایدار از سوی همه ذینفعان بالقوه مورد نیاز است. پروژه‌های نمایشی بیشتری در مقیاس آزمایشی یا نیمه آزمایشی باید در سال‌های آتی با تمرکز بر جنبه‌هایی مانند تعادل انرژی و تجزیه و تحلیل هزینه- فایده که قابلیت بقاء راه‌حل‌های پیشنهادی را تضمین می‌کند، تحقق یابد.

جدول ۱- مقایسه فن آوری های مختلف تبدیل ترمو شیمیایی

فناوری	مزایا	محدودیت‌ها	محصولات	کاربردها
احتراق/ سوزاندن	کاهش جرم (۷۰٪) و حجم (۸۰٪)، فرآیند سریع و ساده بازیابی انرژی، تولید سرباره سمی، آلودگی هوا (دیوکسین ها)	هزینه سرمایه بالا، اعتراض افکار عمومی	حرارت برای دیگ‌های بخار و کوره ها. بازیابی فلزات بالقوه از سرباره	گرمایش، الکتریسیته
گازی شدن	طیف گسترده ای از برنامه ها و مواد اولیه، راندمان تبدیل بالا	هزینه سرمایه بالا، فرآیندهای حساس بالا، انعطاف پذیری کم، خطر شکست مکانیکی، تولید قطران	H_2 ، گاز سنتز غنی از CO، زغال زیستی برای اصلاح خاک	گرمایش، الکتریسیته، حمل و نقل، سوخت و مواد شیمیایی با ارزش بالا
رفع فشار انفجاری	تبدیل لیگنیت، حل شدن همی سلولز	تولید ترکیبات سمی، تجزیه نسبی	قندها ، محصولات قابل هضم	گرمایش، الکتریسیته، حمل و نقل، سوخت و مواد شیمیایی با ارزش بالا
پیرولیز	عملکرد بالا، کاهش تصفیه گاز سنتز، کاهش حجم مواد زائد (۹۰%)	سرمایه بالا، هزینه های نگهداری و بهره برداری،	روغن های زیستی با ویسکوزیته بالا، بیوچار، گاز سنتز	مواد افزودنی، مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته
مایع سازی هیدروترمال	روغن زیستی LHV بالاتر و رطوبت کم	راندمان تبدیل پایین (۲۰-۶۰٪)، تجهیزات فشار بالاتر و هزینه سرمایه بالاتر	نفت سنگین، مواد شیمیایی با ارزش متوسط	مواد افزودنی، مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته
برشته کردن	محصولات همگن و پایدار، پلیت سازی آسان، LHV بالا، آبگریز بودن	چگالی کم انرژی، مقدار خاکستر بالا	زیست توده خشک شده	گرمایش، الکتریسیته

جدول ۲- مقایسه فن آوری های مختلف تبدیل بیولوژیکی

فناوری	مزایا	محدودیت‌ها	محصولات	کاربردها
هضم بیهوازی	کاهش مواد زائد جامد، مواد اولیه با رطوبت بالا، بیوگاز غنی از متان و دی اکسید کربن، کود آلی کم هزینه به عنوان فرآورده جانبی	نیاز به تصفیه و پاکسازی بیوگاز؛ ناپایداری سیستم ؛ عدم جذابیت تسهیلات بزرگ	بیوگاز زیست- هضم	گرمایش، الکتریسیته، حمل و نقل، سوخت و مواد شیمیایی با ارزش بالا
تخمیر	به افزایش انتشار گازهای گلخانه ای کمک نمی‌کند	محدود به مواد اولیه قند، نشاسته یا غنی از سلولز	مایعات و دی اکسیدکربن	افزودنی‌ها، مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته
تخمیر نوری	باکتری های فتوسنتزی می توانند از طیف وسیعی از طیف الکترومغناطیسی استفاده کنند.	راندمان پایین، در حضور اکسیژن مهار می شود.	هیدروژن، دی اکسید کربن، اسیدهای آلی	مواد افزودنی، مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته
تخمیر در تاریکی	قادر به تبدیل طیف گسترده ای از مواد زائد جامد، مقیاس‌پذیر بودن فناوری، مستقل از نور	محدوده نظری پایین، تکنولوژی نابالغ	هیدروژن، اسید استیک	مواد افزودنی، مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته

تصفیه آنزیمی	مصرف الکتریسیته کم، تولید محصول جانبی کم، به کاتالیزورهای سمی نیاز ندارد، می تواند منجر به کاهش حلال شود.	هزینه بالای آنزیم ها، واکنش های آهسته، ضرورت زیاد خلوص، محدودیت در گستره دما و pH	اتانول، اسیدهای آمینه	مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته
الکترولیز میکروبی	تولید هیدروژن، مصرف کم انرژی، تجزیه پساب	مقاومت داخلی بالا، هزینه سرمایه بالا، تولید تا حد زیادی تحت تاثیر ترکیب بستر قرار می‌گیرد.	هیدروژن، متان، استات، اسید فرمیک	تصفیه فاضلاب، مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته

جدول ۳- مقایسه فن آوری های مختلف تبدیل شیمیایی

فناوری	مزایا	محدودیت‌ها	محصولات	کاربردها
هیدرولیز	مواد کم‌هزینه کمتر تهاجمی	آهسته و ناکارآمد، قلیاییت یا اسیدیته بالا، تشکیل نمک‌های بازدارنده	سلولز، همی سلولو و لیگنیت	مواد افزودنی، مواد شیمیایی با ارزش بالا
استخراج حلال	دماهای متوسط، استفاده مجدد از حلال ها، انتخاب پذیری بالای حلال ها، کنترل pH	محصولات میانی، اشباع با حلال	متابولیت های اولیه و ثانویه	مواد افزودنی، مواد شیمیایی با ارزش بالا
ترانس استری شدن	عدم نیاز به تغییر تجهیزات، کاهش آلودگی هوا، کمتر سمی، آسان برای استفاده، کاهش انتشار CO_2	زنجیره تامین ضعیف، ویسکوزیته بالا، هزینه بالا، بو	استرهای متیل اسید چرب (FAME)	حمل و نقل، الکتریسیته
تبدیل فوق بحرانی	استفاده از حلال های ارزان و فراوان. تجزیه حرارتی سریع و کمتر؛ خلوص بهتر ترکیبات	فشارهای بالا مورد نیاز، حالت فوق بحرانی، نگهداری دشوار، نگهداری و تمیز کردن پیچیده	مواد شیمیایی	تصفیه فاضلاب، مواد شیمیایی با ارزش بالا، حمل و نقل، گرمایش و الکتریسیته

۵- منابع

- Bruni, E., A. P. Jensen and I. Angelidaki (2010). "Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production." Bioresource technology **101**(22): 8713-8717.
- Casademont, P., M. García-Jarana, J. Sánchez-Oneto, J. Portela and E. M. de la Ossa (2018). "Hydrogen production by catalytic conversion of olive mill wastewater in supercritical water." The Journal of Supercritical Fluids **141**: 224-229.
- Chen, W.-H., J. Peng and X. T. Bi (2015). "A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews **44**: 847-866.
- Chisti, Y. (2019). Introduction to algal fuels. Biofuels from algae, Elsevier**:** 1-31.
- Das, R. and S. K. Sharma (2018). "Blend of jatropha biodiesel and tyre pyrolysis oil mixed with cerium oxide–an alternative to diesel fuel." Biofuels **9**(6): 739-744.
- Elliott, D. C. (2007). "Historical developments in hydroprocessing bio-oils." Energy & Fuels **21**(3): 1792-1815.
- Europeia, U. (2006). "European Parliament and Council of the European Union." Recommendation of the European Parliament and of the Council of **18**.
- Fathima, N. N., J. R. Rao and B. U. Nair (2014). Effective Utilization of Solid Waste from Leather Industry. The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection, Elsevier**:** 593-613.
- Fernández, C. M., L. Fiori, M. J. Ramos, Á. Pérez and J. F. Rodríguez (2015). "Supercritical extraction and fractionation of Jatropha curcas L. oil for biodiesel production." The Journal of Supercritical Fluids **97**: 100-106.
- Garcia, B. B., G. Lourinho, P. Brito and P. Romano (2019). Review of biofuel technologies in WtL and WtE. Elements of Bioeconomy, IntechOpen**:** 25.
- Gautam, V. K., C. Tompe and B. R. Tamma (2021). OCTANE: A Joint Computation Offloading and Resource Allocation Scheme for MEC Assisted 5G NR Vehicular Networks. 2021 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), IEEE.
- Guo, Y., T. Yeh, W. Song, D. Xu and S. Wang (2015). "A review of bio-oil production from hydrothermal liquefaction of algae." Renewable and Sustainable Energy Reviews 48: 776-790.

- Hajjari, M., M. Tabatabaei, M. Aghbashlo and H. Ghanavati (2017). "A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization." Renewable and Sustainable Energy Reviews **72**: 445-464.
- Han, J. and H. Kim (2008). "The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: an overview." Renewable and sustainable energy reviews **12**(2): 397-416.
- Ho, S.-H., D. Nagarajan, N.-q. Ren and J.-S. Chang (2018). "Waste biorefineries—integrating anaerobic digestion and microalgae cultivation for bioenergy production." Current opinion in biotechnology **50**: 101-110.
- Horan, N., A. Z. Yaser and N. Wid (2018). Anaerobic Digestion Processes, Springer.
- Ishak, Z. I., N. A. Sairi, Y. Alias, M. K. T. Aroua and R. Yusoff (2017). "A review of ionic liquids as catalysts for transesterification reactions of biodiesel and glycerol carbonate production." Catalysis Reviews **59**(1): 44-93.
- Jeguirim, M. and B. Khiari (2022). Thermochemical conversion of tomato wastes. Tomato Processing by-Products, Elsevier**:** 285-332.
- Kadier, A., Y. Simayi, P. Abdeshahian, N. F. Azman, K. Chandrasekhar and M. S. Kalil (2016). "A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production." Alexandria Engineering Journal **55**(1): 427-443.
- Karki, S., N. Sanjel, J. Poudel, J. H. Choi and S. C. Oh (2017). "Supercritical transesterification of waste vegetable oil: Characteristic comparison of ethanol and methanol as solvents." Applied Sciences **7**(6): 632.
- Kijo-Kleczkowska, A., K. Środa, M. Kosowska-Golachowska, T. Musiał and K. Wolski (2016). "Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass." Fuel **170**: 141-160.
- Klinghoffer, N. B. and M. J. Castaldi (2013). Gasification and pyrolysis of municipal solid waste (MSW). Waste to energy conversion technology, Elsevier**:** 146-176.
- Koutsouki, A., E. Tegou, S. Kontakos, M. Kontominas, P. Pomonis and G. Manos (2015). "In situ transesterification of Cynara cardunculus L. seed oil via direct ultrasonication for the production of biodiesel." Fuel Processing Technology **134**: 122-129.
- Kumar, D., B. Singh, A. Banerjee and S. Chatterjee (2018). "Cement wastes as transesterification catalysts for the production of biodiesel from Karanja oil." Journal of cleaner production **183**: 26-34.
- Lee, A. F., J. A. Bennett, J. C. Manayil and K. Wilson (2014). "Heterogeneous catalysis for sustainable biodiesel production via esterification and transesterification." Chemical Society Reviews **43**(22): 7887-7916.
- Leitão, A. (2015). "Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI." Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting **1**(2): 149-171.
- Limousy, L., M. Jeguirim and M. Labaki (2017). Energy applications of coffee processing by-products. Handbook of coffee processing by-products, Elsevier**:** 323-367.
- Maragkaki, A., I. Vasileiadis, M. Fountoulakis, A. Kyriakou, K. Lasaridi and T. Manios (2018). "Improving biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge with a thermal dried mixture of food waste, cheese whey and olive mill wastewater." Waste management **71**: 644-651.
- Moharir, R. V., P. Gautam and S. Kumar (2019). "Waste treatment processes/technologies for energy recovery." Current developments in biotechnology and bioengineering: 53-77.
- Montcho Papin, S., K. T. Christian, A. D. Pascal, S. Assou and S. C. Dominique (2018). "Comparative study of transesterification processes for biodiesel production (A review)." Elixir Appl. Chem **120**: 51235-51242.
- Öhgren, K., R. Bura, J. Saddler and G. Zacchi (2007). "Effect of hemicellulose and lignin removal on enzymatic hydrolysis of steam pretreated corn stover." Bioresource technology **98**(13): 2503-2510.

- Pratap, V., S. Bombaywala, A. Mandpe and S. U. Khan (2021). Solid Waste Treatment: Technological Advancements and Challenges. Soft Computing Techniques in Solid Waste and Wastewater Management, Elsevier**:** 215-231.
- Proskurina, S., J. Heinimö, F. Schipfer and E. Vakkilainen (2017). "Biomass for industrial applications: The role of torrefaction." Renewable Energy **111**: 265-274.
- Rai, P. K. and S. Singh (2016). "Integrated dark-and photo-fermentation: Recent advances and provisions for improvement." International journal of hydrogen energy **41**(44): 19957-19971.
- Ramluckan, K., K. G. Moodley and F. Bux (2014). "An evaluation of the efficacy of using selected solvents for the extraction of lipids from algal biomass by the soxhlet extraction method." Fuel **116**: 103-108.
- Ramos, A., E. Monteiro, V. Silva and A. Rouboa (2018). "Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews **81**: 380-398.
- Reddy, H. K., T. Muppaneni, P. D. Patil, S. Ponnusamy, P. Cooke, T. Schaub and S. Deng (2014). "Direct conversion of wet algae to crude biodiesel under supercritical ethanol conditions." Fuel **115**: 720-726.
- Reddy, P. J. (2011). "Municipal solid waste management." The Netherlands: CRC Press/Balkema. Retrieved October **9**: 2012.
- Rios, M. L. V., A. M. González, E. E. S. Lora and O. A. A. del Olmo (2018). "Reduction of tar generated during biomass gasification: A review." Biomass and bioenergy **108**: 345-370.
- Sadia, S., J. Bakhtawar, M. Irfan, H. A. Shakir, M. Khan and S. Ali (2021). "Role of substrate to improve biomass to biofuel production technologies." Bioprocessing for Biofuel Production: Strategies to Improve Process Parameters: 127-156.
- Sarker, T. R., S. Nanda, A. K. Dalai and V. Meda (2021). "A review of torrefaction technology for upgrading lignocellulosic biomass to solid biofuels." BioEnergy Research **14**: 645-669.
- Schievano, A., F. Adani, L. Buessing, A. Botto, E. N. Casoliba, M. Rossoni and J. L. Goldfarb (2015). "An integrated biorefinery concept for olive mill waste management: supercritical CO 2 extraction and energy recovery." Green Chemistry **17**(5): 2874-2887.
- Shen, R., Y. Jiang, Z. Ge, J. Lu, Y. Zhang, Z. Liu and Z. J. Ren (2018). "Microbial electrolysis treatment of post-hydrothermal liquefaction wastewater with hydrogen generation." Applied energy **212**: 509-515.
- Shen, R., Z. Liu, Y. He, Y. Zhang, J. Lu, Z. Zhu, B. Si, C. Zhang and X.-H. Xing (2016). "Microbial electrolysis cell to treat hydrothermal liquefied wastewater from cornstalk and recover hydrogen: Degradation of organic compounds and characterization of microbial community." International Journal of Hydrogen Energy **41**(7): 4132-4142.
- Soccol, C. R., V. Faraco, S. G. Karp, L. P. Vandenberghe, V. Thomaz-Soccol, A. L. Woiciechowski and A. Pandey (2019). "Lignocellulosic bioethanol: current status and future perspectives." Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels: 331-354.
- Stauffer, E., J. Dolan and R. Newman (2008). "Chemistry and physics of fire and liquid fuels." Fire Debris Analysis: 85-129.
- Syed-Hassan, S. S. A., Y. Wang, S. Hu, S. Su and J. Xiang (2017). "Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations." Renewable and Sustainable Energy Reviews **80**: 888-913.
- Toor, S. S., L. Rosendahl and A. Rudolf (2011). "Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies." Energy **36**(5): 2328-2342.
- Tyagi, S., K.-J. Lee, S. I. Mulla, N. Garg and J.-C. Chae (2019). "Production of bioethanol from sugarcane bagasse: current approaches and perspectives." Applied microbiology and bioengineering: 21-42.
- Unit, S. F. (2017). "Towards a circular economy Waste management in the EU." European Parliamentary Research Service, Brussels.
- Vallero, D. (2014). Fundamentals of air pollution, Academic press.

- Yap, H. and J. Nixon (2015). "A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK." Waste management **46**: 265-277.
- Yusoff, M. H. M., M. Ayoub, M. H. Nazir, F. Sher, I. Zahid and M. Ameen (2021). "Solvent extraction and performance analysis of residual palm oil for biodiesel production: Experimental and simulation study." Journal of Environmental Chemical Engineering **9**(4): 105519.
- Zhang, Y. and W.-T. Chen (2018). Hydrothermal liquefaction of protein-containing feedstocks. Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications, Elsevier**:** 127-168.
- Zhang, Y., Y. Cui, P. Chen, S. Liu, N. Zhou, K. Ding, L. Fan, P. Peng, M. Min and Y. Cheng (2019). Gasification technologies and their energy potentials. Sustainable resource recovery and zero waste approaches, Elsevier**:** 193-206.

Overview of benefits, limitations, by-products and applications of the main technologies of converting waste into energy and biofuel

Mohammad Safari[1], Maryam Ahmadi[2], Gholamhossein Safari[3, 4,*]

1- Medical student, Faculty of Medicine, Islamic Azad University, Kerman branch, Kerman, Iran

2 -Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

3 -Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

[*]4- Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

*Email Address: hsafari13@yahoo.com

Abstract

Introduction

Waste can be described as any type of material or object that has no other use and is to be thrown away. Perspective, the generation of waste materials is unavoidable in a consumption-based society, and it makes waste management a major challenge considering the huge amounts of waste produced globally. In fact, in 2014, about 2.6 billion tons of waste was generated in the European Union (EU), of which 41% was disposed of in landfills, 36% was recycled, 10% was used in excavation operations, 7% was treated in sewage treatment plants and the remaining of 6% was burned for creating energy or oxidation and stabilization of waste. Accordingly, in recent decades, humanity has changed its focus on traditional waste management from the concept of "collection and disposal" in favor of hierarchical management of waste to increase sustainability.Nevertheless, even when environmentally friendly practices such as recycling and reuse are carried out, many operations are "downcycling", meaning that the recycled product has less economic value than its original objective, and is not as valuable as the original product made from strong raw materials. In this way, the linear economy model based on the pyramidal hierarchy of waste materials, which is used today, also has limitations. Indeed, there are still opportunities to increase productivity in many industrial processes, but these gains are likely to be increasingly marginal and undifferentiated. Therefore, the future acceptance of the circular economy concept, as opposed to the current linear model, is a necessary paradigm shift. This new concept is increasingly considered a source of innovation in products, processes, and business models and opens up great opportunities that should be used by companies and organizations as competitive advantages in a dynamic market to be used globally. The processing of raw biomass to produce energy, fuel and chemicals through a combination of different applied technologies is considered a promising path to achieve sustainable waste management, with many environmental and economic benefits. The main processes related to energy recovery and biofuel production are considered under the concept of biorefineries. This waste biorefineries are facilities that integrate the necessary technologies to convert biomass feedstock and other waste into usable products, ensuring that the circular economy moves from theory to the real world. Existing waste streams can be converted to biofuels (waste-to-liquids, WtL) or energy (waste-to-energy, WtE) technologies, both of which are expected to be a key element in future waste management. In general, energy and biofuel production technologies from waste are classified into three main thermochemical, biological and chemical processes. Thermochemical technologies include processes of combustion/incineration, gasification, steam explosion, pyrolysis, hydrothermal liquefaction, and torrefaction; biological technologies include the processes of anaerobic digestion, fermentation, enzyme purification, and microbial electrolysis, and chemical technologies include hydrolysis, solvent extraction, transesterification, and supercritical conversion.

Methodology

The present research is a descriptive-review study whose data was obtained through library studies and various sources were used to process the material. Considering the importance of biofuels as a source of renewable energy, we tried to use as much as possible the most relevant and up-to-date sources containing valuable points regarding the types of energy and biofuel production technologies from biomass. In this review article, the possibility of using the remaining post-processed waste as available and low-cost bio-renewable resources in waste bio-refineries has been investigated. Waste biorefineries are facilities that integrate the necessary technologies to convert biomass feedstock and other waste into

usable products, ensuring that the circular economy moves from theory to the real world. Existing waste streams can be converted to biofuels (waste-to-liquids, WtL) or energy (waste-to-energy, WtE) technologies, both of which are expected to be a key element in future waste management. Accordingly, in this paper, we briefly study the current status of the main WtL and WtE technologies in order to use them as a tool for the management of residual post-processing wastes and by-products resulting from them, and finally about Future developments on the mentioned technical options are briefly discussed.

Conclusion

In this review research, the possibility of using the remaining waste after processing as abundant and low-cost bio-renewable resources in waste bio-refineries in the future was investigated. Existing waste streams have a complex and diverse composition according to their source, which require new logistics platforms of classification and valuation. With the exhaustion of the linear economy of "collection and disposal", new methods of waste management are inevitable in the long term. In this way, waste biorefineries that generate green energy and produce virtual products with high value and zero waste (no waste) in a "closed loop" and "up-cycling" approach are the "landfills" of the future. It is expected that they will be very important and vital in bringing sustainable waste management into the real world that will allow transformative economic growth under the concept of circular economy. However, from the technologies reviewed, it can be concluded that individual WtL and WtE processes are almost always limited in their scope and produce multiple unwanted products. In this regard, the gasification process is largely considered a technology with greater potential and scope in individual applications. However, even this process has drawbacks such as reactor design, feed system, and bitumen production that require costly post-treatment and/or further technical improvements. In contrast, the combination of several WtE and WtL processes in an integrated waste biorefinery allows reducing and eliminate the drawbacks of each process. For example, in gasification, some of the unwanted materials produced may be used and valued by further chemical processing, and even syngas can be upgraded. This new pyramid of waste valorization creates opportunities for specific technologies such as explosive depressurization and drying to become practical applications by reinforcing other well-established technologies in an integrated approach. Future research should primarily focus on establishing a hierarchy of processes to produce the highest value products, and then gradually progress to low-cost products and energy production. However, for this vision to become a reality, an increased effort by researchers is required with continued and sustained support from all potential stakeholders. More pilot or semi-pilot scale demonstration projects should be realized in the coming years, focusing on aspects such as energy balance and cost-benefit analysis that will ensure the viability of the proposed solutions.

Keywords

"biofuel", “energy recovery ", "Waste", "bioenergy", biorefinery.