

تولید انرژی سبز از پسماند، راهی به سوی توسعه پایدار

مهشید گلستانه

استادیار آموزش شیمی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

m.golestaneh@cfu.ac.ir

چکیده

در مباحث مربوط به توسعه پایدار، انرژی بیشترین اهمیت را دارد. بنابراین، توسعه پایدار نیازمند عرضه پایدار منابع انرژی پاک، تجدیدپذیر و مقرون به صرفه است. منابع انرژی مانند نور خورشید، باد، آب، زمین گرمایی، امواج و جزر و مد از جمله منابع تجدیدپذیر هستند. نگرانی درباره تغییرات زیست محیطی به همراه افزایش قیمت نفت باعث وضع قوانینی می شود که بهره برداری و تجاری سازی این منابع سرشار تجدیدپذیر را تشویق می کنند. از سوی دیگر انرژی زیست توده نیز یک منبع انرژی پایدار به شمار می رود. پسماندها از طریق فناوری های تبدیل پسماند به انرژی به انرژی های مفیدی همانند بیو هیدروژن، بیوگاز، بیو الکل و غیره، تبدیل می شوند. تبدیل پسماندهای جامد شهری به انرژی علاوه بر این که راه حلی برای کاهش اثرات منفی زیست محیطی و کمک به بهداشت عمومی است، یکی از رویکردهای مهم تولید سوخت های زیستی تجدیدپذیر نیز بشمار می رود. در این مقاله، ضمن بررسی کلی فناوری های زیستی نظیر تجزیه زیستی در اثر تابش و تخمیر پسماند، الگوهای احتمالی استفاده از انرژی در آینده و اثرات مرتبط با آن، راه حل های بالقوه برای مشکلات زیست محیطی و فناوری های تجدیدپذیر انرژی و ارتباط آنها با توسعه پایدار با تاکید بر مسیرهای تبدیل پسماند به انرژی مورد بحث قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: پسماند، انرژی پایدار، تبدیل پسماند به انرژی، بیوگاز، بیو هیدروژن

Green energy from waste, a pathway to sustainable development

Mahshid Golestaneh

Assistant Professor of Chemistry education, Department of Sciences, Farhangian University, Tehran, Iran

Abstract

Energy is a key in the discussions on sustainable development. Therefore, sustainable development requires the supply of sustainable, clean and affordable renewable energy sources. Energy sources such as solar radiation, the winds, water, geothermal, waves, and tides are among the most renewable sources. Concerns about environmental change, coupled with rising oil prices, have created rules that encourage the exploitation and commercialization of these renewable resources. On the other hand, waste and biomass energy is also a sustainable energy source. Wastes are converted from waste-to-energy conversion technologies into useful energy such as biohydrogen, biogas, bio-alcohol, and so on. Conversion of municipal solid waste to energy, in addition to a solution to reducing negative environmental impacts and helping public health, is one of the most important approaches to the development of renewable biofuels. In this article, with the general review of biotechnology such as waste biodegradation through radiation and fermentation, possible future energy utilization patterns and its associated impacts, potential solutions to environmental problems and renewable energy technologies, and their relation to sustainable development with the emphasis on waste-to-energy routes (WTERs) are discussed.

Keywords: Waste, Sustainable energy, Waste-to-energy routes, Biogas, Biohydrogen

گلخانه‌ای متان، ۲۸ برابر بیشتر از کربن دی اکسید است [۸]. به عنوان مثال، بیش از ۹۵ درصد از پسماند مواد غذایی وارد سایت‌های دفن پسماند می‌شود که به دلیل انتشار متان و دیگر گازهای گلخانه‌ای تاثیر فاجعه باری بر آب و هوا می‌گذارد [۱۰، ۹]. بر اساس گزارش هیات بین دولتی تغییرات اقلیمی^۲ (IPCC) گازهای آزاد شده به اتمسفر از دهه ۱۹۵۰ افزایش یافته است و باعث گرم تر شدن سیاره زمین شده است [۱۱]. تاثیرات این گرم شدن شامل تغییرات آب و هوایی، گرم شدن آب اقیانوس ها، بالا آمدن سطح آب دریاها و ذوب شدن یخچال های قطبی است. بنابراین رویارویی و تلاش برای رفع این مشکلات از چالش های مهم قرن بیست و یکم است.

روش دیگر تصفیه پسماند، سوزاندن آن برای تولید گرما و انرژی است. اگر چه سوزاندن یک روش با ارزش به خصوص در مناطق دور افتاده تر است، اما به دلیل تولید دی اکسید و آلاینده های پایدار آلی مشابه می تواند منجر به آلودگی هوا نیز شود. از سوی دیگر شانس استخراج مواد شیمیایی ارزشمند موجود در پسماند از دست می‌رود [۱۲، ۱۰]. علاوه بر این، سوزاندن، هزینه سرمایه و هزینه های عملیاتی را بالا می‌برد و لازم است تا مراقبت های ویژه ای برای خاکستر تولید شده در طول فرایند انجام شود. کمپوست کردن راه دیگر تصفیه پسماند است. منظور از کمپوست کردن فرایندی است که طی آن مواد آلی تثبیت شده با استفاده از میکرو ارگانیسم های طبیعی تولید می‌شود. کمپوست می‌تواند به عنوان یک کود سازگار با محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، روند کمپوست کردن باید به درستی انجام شود، در غیر این صورت کمپوست می‌تواند سبب بروز مشکلاتی مانند ایجاد بوی نامطبوع و تولید احتمالی گازهای گلخانه‌ای شود [۱۰].

امروزه تجمع پسماندها در محیط زیست و مشکلات ناشی از آن، آگاهی عمومی را نسبت به چگونگی دفع پسماندهای موجود در محیط زیست افزایش داده است. به طور کلی لزوم دستیابی به پایداری محلی و جهانی، جامعه را به اتخاذ شیوه‌های فردی و جمعی کاهش تولید پسماند ترغیب می‌کند [۱۳]. طرح‌های خوبی مانند ۳Rs (کاهش دادن^۳، استفاده مجدد^۴ و بازیافت^۵) و تصفیه گرمایی یا بیولوژیکی MSW برای تولید انرژی و خنثی سازی اثرات تهاجمی آن، از جمله اقدامات توصیه شده است. با

مشکلات رو به رشد زیست محیطی، شامل گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و آب، همراه با بحران انرژی و کمبود منابع، در دهه های آتی بیشتر خواهد شد. از این رو نیازمند اقداماتی برای ایجاد پایداری در جامعه جهانی هستیم. یکی از مولفه های اصلی پایداری در جهان، انرژی است. امروزه بیش از ۸۰ درصد از کل انرژی اولیه جهان از سوخت های فسیلی تامین می‌شود [۱۱]. این امر باعث آزاد شدن کربن دی اکسید و سایر ترکیبات سمی (مانند ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن) در اتمسفر می‌شود. تخمین زده می‌شود که ۹۰ درصد از انتشار جهانی کربن دی اکسید (در سال ۲۰۱۱ حدود ۳۴ میلیارد تن گازهای گلخانه‌ای تولید شده است) از احتراق سوخت های فسیلی حاصل شده است [۲]. از سوی دیگر امنیت عرضه انرژی موضوع مهمی برای بشریت است اما منابع فسیلی محدود هستند و استفاده از آنها به عنوان مواد اولیه، پایدار و همیشگی نیست. به همین دلیل یافتن منابع پایدار انرژی توجه زیادی را در سطح جهان به خود جلب کرده است.

چالش مهم دیگر در سطح جهانی، افزایش تجمع پسماند در محیط زیست است. افزایش جمعیت انسانی و شهرنشینی، نوآوری های تکنولوژیکی و تغییرات عمیق در الگوهای رفتاری و شیوه زندگی در دهه های گذشته، میزان تولید پسماند جامد شهری^۱ (MSW) را افزایش داده است [۳، ۴]. بانک جهانی برآورد می‌کند که پسماند جامد تولید شده از مناطق شهری در سراسر جهان از حدود ۳/۵ میلیون تن پسماند تولید شده در روز که در حال حاضر وجود دارد به ۶/۱ میلیون تن در روز تا سال ۲۰۲۵ افزایش خواهد یافت [۴]. طبق گزارش یونیسف و سازمان بهداشت جهانی بسیاری از شهرهای جهان هنوز راه حل مناسبی برای دفع پسماند های جامد خود ندارند [۵]. روش هایی که به طور گسترده برای تصفیه و مدیریت پسماندهای جامد شهری بکار می‌رود از جمله دفن پسماند، سوزاندن و تهیه کمپوست هر یک دارای معایبی است. قرار دادن پسماندهای جامد شهری در سایت های دفن پسماند به دلیل خطرات بهداشت عمومی، آلودگی خاک و آب های زیرزمینی، ایجاد بوی ناخوشایند و گسترش میکرو ارگانیسم های بیماریزا یک مشکل جدی است [۷، ۶]. علاوه بر اثرات منفی بر سلامت عمومی و اکوسیستم، تصفیه ناکافی MSW سبب افزایش گرمایش جهانی نیز می‌شود؛ زیرا طی تجزیه پسماند آلی، گازهای متان و کربن دی اکسید تولید می‌شوند. اثر

^۲ - Intergovernmental Panel on Climate Change

^۳ - Reduce

^۴ - Reuse

^۵ - Recycle

^۱ - Municipal solid waste

نقل، تولید برق و تولید جایگزین‌های سوخت از جمله بیوگاز، گاز هیدروژن و بیو متان در این مقاله بررسی شده است.

مشکلات جهانی و انرژی‌های تجدیدپذیر

استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌تواند باعث بروز تغییرات اقلیمی جهانی، منازعات انرژی در جهان و کمبود منابع انرژی شود که به طور فزاینده‌ای ثبات در جهان را تهدید می‌کند. این مشکلات جهانی شامل کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی به دلیل رشد جمعیت جهان و افزایش تقاضای انرژی و از سوی دیگر افزایش میزان پسماندها (جامد / مایع) در محیط زیست است. تغییرات آب و هوایی ایجاد شده در سطح جهانی نیز به دلیل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر از دیگر مشکلاتی است که پایداری جهان را تهدید می‌کند.

پسماندهای مختلف حاصل از منابع کشاورزی (پسماند گیاهی و حیوانی)، صنعتی (کارخانه‌های قند، لبنیات و شیرینی پزی، صنایع کاغذسازی، چرم و کشتارگاه‌ها) و بخش‌های مسکونی (پسماند آشپزخانه و باغبانی) قابلیت استفاده به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر از طریق مسیرهای WTERs و دستیابی به پایداری در جهان را دارند. بیشتر محققان بر این باورند که برای توسعه پایدار و زندگی طولانی مدت در سیاره زمین، بشر ناگزیر است تا از WTERs برای برطرف کردن نیازهای روزانه انرژی خود بهره جوید. در میان کشورهای جهان، کشورهای عضو اتحادیه اروپا، تحقیقات قابل توجهی را در زمینه تولید انرژی‌های تجدیدپذیر انجام داده‌اند، برای مثال مایر^۲ و همکاران، سناریویی برای توسعه پایدار از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر برای دانمارک، نروژ و سوئد به طور جداگانه برای سال ۲۰۳۰ طراحی کردند [۲۲]. هم‌چنین پانوتسو^۳ و همکاران پتانسیل آینده منابع زیست توده در اروپا را بر اساس بخش‌های مختلفی از جمله کشاورزی، صنعت و غیره مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. منابع انرژی مانند نور خورشید، باد، امواج و جزر و مد به عنوان منابع تجدیدپذیر شناخته می‌شوند و تا مدت زمان نسبتاً طولانی تمام نمی‌شوند. استفاده از این منابع انرژی پایدار که به فراوانی در دسترس هستند می‌تواند باعث:

- کاهش و یا متوقف ساختن اختلافات میان کشورها در مورد ذخایر انرژی

این حال، حجم زیاد پسماندی که در سطح جهانی تولید می‌شود، در کنار تنوعی که در حال حاضر این پسماندها دارند، به همراه توان ارزشی پسماند برای تولید سوخت‌ها و مواد شیمیایی با ارزش، آن‌ها را گزینه ایده آلی برای برنامه‌های ارزشمند قرار داده است [۱۴]. یکی از این برنامه‌های ارزشمند، تبدیل پسماند به انرژی است که علاوه بر این که می‌تواند نقش مهمی در جبران مصرف سوخت‌های فسیلی و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر داشته باشد، به تصفیه پسماندها [۱۵] نیز کمک کند. پسماندهای جامد وقتی به اندازه کافی تصفیه شوند، می‌توانند سهم بزرگی در انرژی، اقتصاد و محیط زیست داشته باشند. تولید انرژی از پسماند، بخش مهمی از مدیریت پسماندهای مدرن است. اخیراً تحقیقات در مورد راهبردهای انرژی‌های جایگزین، اهمیت زیادی پیدا کرده است که مهم‌ترین اثر آن کمک به ثبات جهانی است. مهم‌ترین ویژگی یک منبع انرژی جایگزین، سازگاری محیطی آن‌هاست. با این مشخصه، منابع انرژی تجدیدپذیر (به ویژه قسمتی که از تبدیل پسماند زیستی به انرژی حاصل می‌شود) به احتمال زیاد یکی از جذاب‌ترین جایگزین‌ها در آینده‌ی نزدیک خواهند بود.

پسماندهای قابل بازیافت حاصل از کشاورزی [۱۶، ۱۷]، صنایع [۱۸، ۱۹] و منابع خانگی و شهری [۲۰، ۲۱] از طریق راه‌های تبدیل پسماند به انرژی^۱ (WTER) به شکل انرژی‌های مفیدی مانند بیوهیدروژن، بیوگاز، بیوالکل و غیره تبدیل می‌شوند که می‌توانند به افزایش پایداری جهان کمک کنند. به طور معمول، چهار مسیر تولید انرژی برای دستیابی به پایداری وجود دارد. این مسیرهای انرژی عبارتند از:

- ۱- ادامه استفاده از فناوری‌های فعلی تولید انرژی همراه با انجام اصلاحات بر روی آن‌ها
- ۲- پذیرش جهانی فناوری‌های پیشرفته انرژی برای حمل و نقل و تولید برق
- ۳- تولید منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین از پسماندها و زیست توده برای تکمیل فرایندهای تولید انرژی معمولی
- ۴- توسعه مسیرهای تولید انرژی پاک و سیستم‌های توزیع پاک. هدف از این پژوهش بررسی پتانسیل مربوط به مسیر ۳ برای افزایش پایداری منابع انرژی است. تولید منابع انرژی جدید به شیوه‌ی تخمیر میکروبی، اتخاذ فناوری‌های WTER برای حمل و

^۱ - Meyer

^۲ - Panoutsou et al.

^۳ - waste-to-energy routes

نهرها تولید شده است [۲۴]. در شرایط بی‌هوازی مواد آلی از طریق واکنش‌های میکروبیولوژیکی به گاز (بیوگاز) و کود آلی تبدیل می‌شوند، اما پس از تجزیه پسماندهای جامد آلی در شرایط هوازی، تنها کود کشاورزی تولید می‌شود. بدین ترتیب، فناوری بیوگاز گزینه بهتری برای پسماندهای زیست تخریب پذیر است و بیوگاز حاصل از آن می‌تواند به عنوان منبع انرژی و باقیمانده جامد برجا مانده به عنوان کود مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر قابل توجهی از پسماندهای تولید شده در بخش‌های کشاورزی، صنعتی، شهری و غیره را مواد آلی زیست تخریب پذیر تشکیل می‌دهد. اگر این پسماند، به صورت بی‌هوازی پردازش شوند، نه تنها مقدار قابل توجهی بیوگاز (حدود ۲۵۰-۳۵۰ متر مکعب به ازای هر تن پسماند و کود تولید می‌شود [۲۴]، بلکه باعث کاهش نیاز به مکان‌های لازم برای دفن پسماند خواهد شد و به نوبه خود از آلودگی محیط زیست به علت تجزیه بدون کنترل مواد آلی در سایت‌های دفن پسماند جلوگیری می‌شود. بوالاگو^۱ و همکاران تولید بیوگاز از پسماند میوه و سبزی را بررسی کردند [۲۵]. در تحقیقات مشابهی پسماند بازار سبزیجات (سبزیجات فاسد، پوست میوه، سیب زمینی، پیاز و غیره) و پسماند خانگی به طور گسترده برای تولید بیوگاز استفاده شده است [۲۶، ۲۷].

بیوگاز ترکیبی از متان (CH_4)، دی اکسید کربن (CO_2)، نیتروژن (N_2)، هیدروژن (H_2)، و اکسیژن (O_2) است. هم-چنین ترکیبات دیگری که در طول هضم تولید می‌شود شامل ترکیبات گوگرد (سولفید هیدروژن و آلکی تیول‌ها)، آمونیاک، الکل، ترکیبات کربونیل (از جمله آلدئیدها و کتون‌ها)، اسیدهای کربوکسیلیک (مانند فرمیک اسید و استیک اسید)، تری‌ها و ترکیبات معطر است [۲۸].

متان جزء اصلی بیوگاز است و می‌تواند به عنوان سوخت بکار رود. حدود ۹۰ درصد انرژی مواد اولیه در متان حفظ می‌شود. این انرژی بطور عمده برای پخت و پز، روشنایی و موتورهای احتراق داخلی در پمپ‌های آب و ژنراتورهای الکتریکی بکار می‌رود. بیشترین مزایای اقتصادی استفاده از فناوری بیوگاز، به حداقل رسیدن آلودگی محیط زیست و تامین انرژی برای اهداف مختلف است. اگر چه تولید بیوگاز، تکنولوژی خوبی است و استفاده از آن به طور گسترده‌ای تأیید و پذیرفته شده است، اما سهم آن در تقاضای کل انرژی کشورهای صنعتی، هنوز ناچیز است. علت آن عدم علاقه سیاسی و نبود سیاست‌های عمومی برای حمایت از

- تسهیل و یا نیاز به توسعه فناوری‌های جدید WTER
- کاهش آلودگی هوا، آب و زمین و جلوگیری از نابودی جنگل‌ها
بنابراین لازم است تا منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار، جایگزین منابع فعلی شوند و به ویژه کشورهای در حال توسعه، سرمایه-گذاری در زمینه ایجاد مسیرهای تجدید پذیر WTER را افزایش دهند.

جایگزین‌های احتمالی WTER

نیاز جهانی برای انرژی در سال ۲۱۰۰، شش برابر خواهد شد. در کشورهای در حال توسعه مانند هند و چین، نسبت انرژی در دسترس به انرژی مورد نیاز بسیار ناسازگار است. این توزیع نابرابر انرژی در جهان، لزوم توسعه یک فناوری که بتواند به عنوان منبع ثانویه انرژی بکار رود و بحران انرژی را کاهش دهد، آشکار می‌سازد [۲۴]. عاقلانه است که سوخت‌هایی را توسعه دهیم که دی اکسید کربن زیادی تولید نمی‌کنند و به راحتی می‌توانند با استفاده از پسماندهای زیست محیطی تولید شوند. فناوری WTER ممکن است به عنوان یک جایگزین بالقوه در نظر گرفته شود زیرا نه تنها منبع انرژی تجدیدپذیری فراهم می‌کند بلکه باعث بازیافت ترکیبات آلی قابل تجزیه موجود در پسماندهای تولیدی نیز می‌شود. مواد زیستی موجود در پسماند از طریق فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی تجزیه می‌شوند. تبدیل بیوتکنولوژی MSW شامل استفاده از میکرو ارگانیسم‌ها برای تبدیل بخش آلی MSW به مولکول‌های مختلف است. شایع‌ترین فرآیند تبدیل میکروبی MSW عبارت از تولید سوخت مایع (اتانول) و سوخت‌های گازی (متان و هیدروژن) است. ترکیب MSW با توجه به منبع پسماند متفاوت است و تاثیر زیادی بر بازده فرآیندهای بعدی دارد. به طور کلی، وجود درصد بالاتری از مواد غذایی و پسماندهای گیاهی مطلوب تر است، زیرا این پسماندها به راحتی تجزیه می‌شوند و در مقایسه با پسماندهای دیگر مانند کاغذ و کارتن، منجر به بازده بالاتری می‌شوند. در ادامه تولید بیولوژیکی متان، هیدروژن و اتانول از پسماندهای جامد بررسی می‌شود.

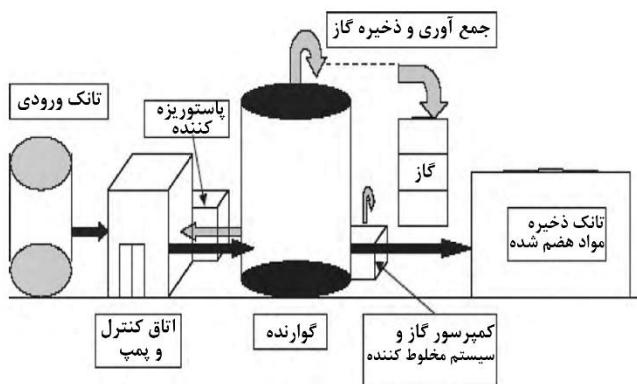
انواع سوخت‌های زیستی حاصل از پسماند

۱- بیوگاز (متان)

در سال ۱۷۷۶، فیزیکدان ایتالیایی ولتا، تشریح کرد که متان موجود در گاز مرداب از مواد آلی موجود در رسوبات باتلاق‌ها و

^۱ - Bouallagui

عملکرد بیوگاز، به تنهایی و یا همراه با عملیات حرارتی (۱۲۱) درجه سانتی‌گراد، ۲۰ دقیقه) و تصفیه شیمیایی (g / L) NaOH را مورد بررسی قرار دادند.



شکل ۱- طرح شماتیک سیستم هضم بی‌هوازی [۲۴]

استفاده از هضم بی‌هوازی برای تصفیه MSW به جای فرایندهای دیگر، مانند سوزاندن و تبدیل به گاز کردن، هزینه سرمایه بسیار کمتری دارد که اهمیت هضم بی‌هوازی را به عنوان روش تصفیه MSW مطرح می‌کند. تولید بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی موجب مزایای قابل توجهی نسبت به سایر روش‌های تصفیه پسماند می‌شود، از جمله [۲۴]:

- تولید لجن کمتر در مقایسه با فناوری‌های هوازی
- موفقیت در تصفیه پسماندهای مرطوب با ماده خشک کمتر از ۴۰ درصد
- حذف موثرتر عوامل بیماری‌زا. این امر مخصوصاً برای هضم‌های چند مرحله‌ای و یا اگر مرحله پاستوریزاسیون در فرایند وجود داشته باشد، صادق است.
- کاهش انتشار گازهای مضر چون ۹۹ درصد ترکیبات فرار، در حین احتراق به صورت اکسید تجزیه می‌شوند، به عنوان مثال H_2S به SO_2 تبدیل می‌شود.
- استفاده از لجن تولید شده به عنوان یک کود بهبود یافته برای گیاهان
- ایجاد یک منبع طبیعی انرژی کربن به شکل بیوگاز
- کاربردهای بیوگاز شامل استفاده از آن به عنوان سوخت خودرو (پس از غنی‌سازی ترکیب آن در متان) و تولید گرما و برق از طریق سوزاندن در تجهیزات ویژه‌ای به نام گرما و قدرت ترکیبی^۵ است. استفاده از متان به عنوان سوخت خودرو، چندین مزیت

منابع انرژی تجدیدپذیر است. در بسیاری از موارد به دلایل ایمنی از جمله جلوگیری از انفجار، بیوگاز انباشته در سایت دفن پسماند جمع آوری و سوزانده می‌شود. در این فرایند متان به کربن دی‌اکسید و آب تبدیل می‌شود.

فرایند هضم بی‌هوازی روشی پیچیده و شامل چندین مرحله است که هر یک توسط کنسانتره‌های مختلف میکرو ارگانیسم‌ها کاتالیز می‌شود. این مراحل شامل هیدرولیز مولکول‌های پیچیده به مونومر و متعاقب آن مراحل تشکیل اسید، تشکیل استات و تشکیل متان است [۲۹،۳۰]. هضم بی‌هوازی در یک ظرف بدون هوای درزگیری شده و گرم انجام می‌شود. این حالت شرایط ایده‌آل را برای باکتری‌ها جهت تجزیه مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن فراهم می‌کند. مخزن هضم باید گرم شود و کاملاً مخلوط گردد تا شرایط ایده‌آل برای فعالیت باکتری‌ها جهت تبدیل مواد آلی به بیوگاز (مخلوطی از کربن دی‌اکسید، متان و مقدار کمی گازهای دیگر) فراهم گردد. فرایند هضم بی‌هوازی بطور عمده به دو نوع تقسیم می‌شود: هضم مازوفیلی^۱ (محدوده دما = ۳۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان نگهداری ۱۵-۳۰ روز) و هضم گرماگرای^۲ (محدوده دما = ۵۵ درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری ۱۴-۱۲ روز). به طور کلی، شرایط گرماگرای ترجیح داده می‌شود، زیرا باعث هضم سریع‌تر و افزایش تولید متان می‌گردد. علاوه بر این، درجه حرارت بالاتر منجر به حداقل رسیدن مشکلات آلودگی می‌شود [۳۱]. سچی و همکاران^۳ [۳۲] بیان کردند که شرایط گرماگرای برای هضم MSW بهتر است و میزان تولید گاز نسبت به هضم مازوفیلی ۲-۳ برابر بیشتر می‌شود. درجه حرارت بالاتر باعث سهولت آزادسازی آمونیوم می‌شود که می‌تواند به عنوان کود مورد استفاده قرار گیرد. شماتیک سیستم هضم بی‌هوازی برای تولید بیوگاز در شکل ۱ نشان داده شده است.

علاوه بر افزایش دما، راه دیگر برای بهبود عملکرد تولید بیوگاز از MSW، استفاده از مرحله پیش تصفیه قبل از هضم است. پیش تصفیه می‌تواند هیدرولیز مولکول‌های پیچیده و به خصوص مولکول‌های سرسختی مانند سلولز را افزایش دهد که به نوبه خود به بهبود هضم می‌انجامد. تکنیک‌های مختلف پیش پردازش می‌تواند به تنهایی و یا بصورتی ترکیبی بکار رود. به عنوان مثال، دل بورگی و همکاران^۴ [۳۳] اثر پیش هیدرولیز باکتریایی بر روی

^۱ - Mesophilic digestion

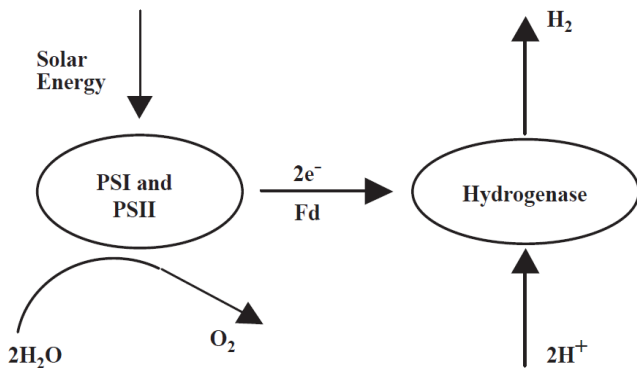
^۲ - Thermophilic digestion

^۳ - Cecchi

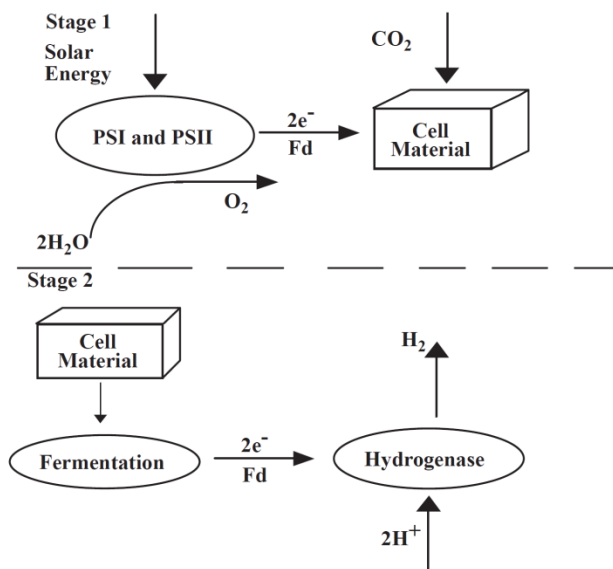
^۴ - Del Borghi et al.

^۵ - Combined Heat & Power

ادغام با فناوری پیل‌های سوختی و پیل‌های هیدروژنی مزایای بالقوه عالی را ارائه می‌دهد [۳۸]. علاوه بر این تخمین زده می‌شود که هزینه پردازش تولید هیدروژن به وسیله تخمیر در تاریکی ۳۴۰ مرتبه کمتر از فرایندهای نورانی است [۳۹]. طبیعت و ترکیب MSW به شدت بر روی تولید هیدروژن اثر می‌گذارد. مواد غنی از اشکال ساده‌تر کربوهیدرات‌ها، هیدروژن بالاتری تولید می‌کنند، در حالی که مواد نفتی و لیگنوسلولوزی منجر به عملکرد بسیار ضعیفی می‌شوند [۴۰]. مقایسه هیدروژن و سوخت‌های دیگر در رابطه با خواص کلیدی در جدول ۱ آمده است [۲۴].



شکل ۲- شماتیک تجزیه زیستی مستقیم در اثر تابش



شکل ۳- شماتیک تجزیه زیستی تابشی غیر مستقیم برای تولید هیدروژن

دارد، زیرا وسیله نقلیه نیازی به تغییر ندارد [۳۴]. در مقایسه با سوخت‌های دیگر مانند اتانول، تولید متان بیشتر کارآمد است و در نتیجه نسبت تولید خروجی به انرژی ورودی بالاتر است [۳۵].

۲- هیدروژن

هیدروژن به عنوان یک منبع انرژی پایدار، جایگزین امیدوار کننده‌ای برای سوخت‌های فسیلی است. هیدروژن یک سوخت پاک و دوستدار محیط زیست است که در هنگام احتراق به جای گازهای گلخانه‌ای، آب تولید می‌کند و به نظر می‌رسد که پایانی منطقی برای بسیاری از مسائل زیست محیطی مانند باران اسیدی و اثر گلخانه‌ای باشد. همچنین هیدروژن می‌تواند به طور مستقیم برای تولید برق از طریق پیل‌های سوختی هیدروژنی یا سایر انواع پیل‌های سوختی مانند SOFC بکار رود [۳۶]. این محصول دارای بازده انرژی بالا (۱۲۲ کیلوژول بر گرم است که ۲/۷۵ برابر بیشتر از هیدروکربن‌ها است) [۳۷].

یکی از راه‌های به حداقل رساندن وابستگی به منابع فسیلی، تولید انرژی از طریق تبدیل میکروبی منابع تجدیدپذیر است. برای مقاصد جهانی زیست محیطی، تولید هیدروژن توسط واکنش‌های بیولوژیکی از پسماندهای آلی تجدیدپذیر، سهم مهمی از تولید انرژی زیستی است. تولید هیدروژن زیستی در مقایسه با فرایندهای الکتروشیمیایی- نوری یا گرماشیمی به دلیل نیاز به انرژی و هزینه سرمایه کمتر مزیت دارد. تولید زیستی هیدروژن می‌تواند به صورت تخمیری (تخمیر نورانی یا تخمیر در تاریکی) و یا تجزیه زیستی در اثر نور^۱ (زیست کافت مستقیم آب توسط جلبک‌ها و سیانو باکتری‌ها یا تولید هیدروژن بیوالکتریکی در پیل‌های سوختی میکروبی) انجام شود [۳۷]. تمام این فرایندها توسط آنزیم‌های تولید کننده هیدروژن مانند هیدروژناز و نیتروژناز کنترل می‌شود. در شکل‌های ۲-۵ روش‌های تولید بیولوژیکی هیدروژن نشان داده شده است.

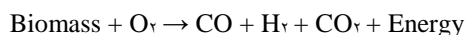
جایی که ترکیبات آلی در دسترس باشد، فرایند تخمیر سودمندتر است، زیرا می‌تواند از مواد زائد مختلف به عنوان ماده خام استفاده کند. از سوی دیگر مسیر تخمیر در تاریکی، فناوری قابل قبولی با ارزشهای تجاری است و برای کاربردهای عملی و

^۱ - Biophotolysis

کشاورزی و صنایع غذایی و برخی از پساب‌های صنایع غذایی مانند آب پنیر [۴۶]، آسیاب زیتون و مخمر آجیو [۴۶] با کمک فناوری‌های زیستی مناسب می‌توانند برای تولید هیدروژن بکار روند. برای تولید هیدروژن پایدار از طریق WTER، مواد اولیه باید ویژگی‌های خاصی داشته باشند از جمله این‌که مواد اولیه به طور عمده منبع کربن آلی باشند، از منابع پایدار (پسماند) تهیه شده باشند و از غلظت کافی برخوردار باشند تا تبدیل تخمیری و بازیافت انرژی از نظر انرژی مطلوب باشد، نیاز به حداقل پیش تصفیه داشته باشد و هزینه کمی داشته باشد.

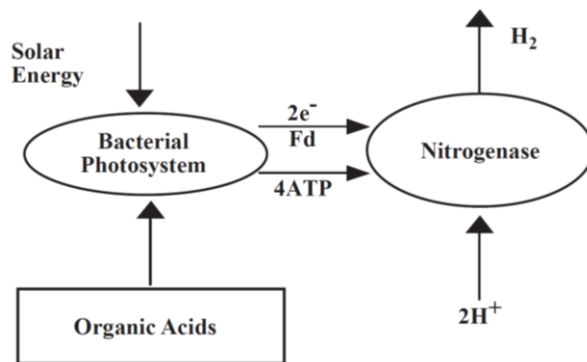
استفاده از پسماند برای تولید هیدروژن، تولید انرژی ارزان را همزمان با تصفیه پسماند انجام می‌دهد. پیش بینی شده است که هیدروژن منبع اصلی انرژی تا سال ۲۱۰۰ خواهد بود [۲۴]. بنابراین، هیدروژن تولید شده از منابع تجدیدپذیر ممکن است به عنوان سیستم انرژی طبیعی و پاک محسوب شود. برخی از مواد زیست توده (باقیمانده محصولات کشاورزی و جنگلی چوب سخت، چوب نرم و گیاهان علفی) نیز برای تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گرفته‌اند (جدول ۲).

به طور کلی، تبدیل زیست توده و پسماندهای مورد استفاده با راندمان حداکثر تولید هیدروژن در محدوده دمایی ۶۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. واکنش به شرح زیر است:

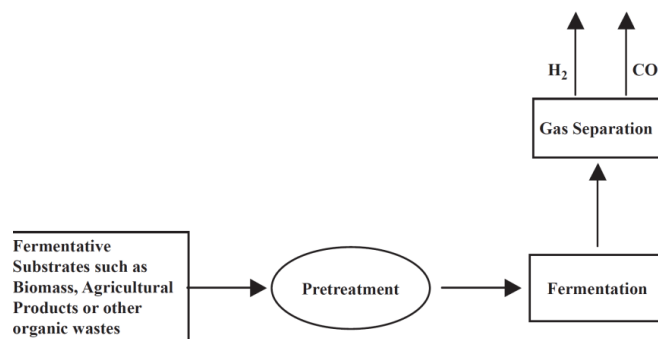


جدول ۲- منابع زیست توده مورد استفاده در تولید هیدروژن

مواد اولیه زیست توده	فناوری تبدیل اصلی
پوسته بادام	گازسیون بخار
خاک اره چوب کاج	تبدیل بخار
خرده لاستیک	تبدیل فوق بحرانی
کاه برنج / آب گندم دانمارکی	پیرولیز
میکرو جلبک‌ها	گازسیون
پسماند چای	پیرولیز
پوسته بادام زمینی	پیرولیز
دوغاب خاک اره افرا	تبدیل فوق بحرانی
دوغاب زیست توده نشاسته	تبدیل فوق بحرانی
پسماند شهری	تبدیل فوق بحرانی
لیگنین کاغذ بسته بندی	گازسیون بخار
MSW	تبدیل فوق بحرانی
پسماند کاغذ و خمیر کاغذ	تبدیل میکروبی



شکل ۴- شماتیک تخمیر نوری



شکل ۵- تولید هیدروژن با روش تخمیر در تاریکی

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های هیدروژن و سایر سوخت‌ها

نوع سوخت	انرژی (J/Kg)	انرژی (J/m ³)	میزان نشر کربن (Kg سوخت / Kg کربن)
هیدروژن مایع	۱۴۱/۹۰	۱۰/۱۰	۰/۰۰
هیدروژن گازی	۱۴۱/۹۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰
نفت کوره	۴۵/۵۰	۳۸/۶۵	۰/۸۴
بنزین	۴۷/۴۰	۳۴/۸۵	۰/۸۶
متانول	۲۲/۳۰	۱۸/۱۰	۰/۵۰
اتانول	۲۹/۹۰	۲۳/۶۰	۰/۵۰
بیودیزل	۳۷/۰۰	۳۳/۰۰	۰/۵۰
گاز طبیعی	۵۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۴۶

مواد اولیه و تکنیک‌های زیادی برای تهیه هیدروژن از سوخت‌های فسیلی، آب و زیست توده وجود دارد. از میان این روش‌ها، الکترولیز آب، تبدیل بخار هیدروکربن‌ها و فرآیندهای اتوترمال، روش‌های شناخته شده تولید گاز هیدروژن هستند، اما به دلیل نیاز به انرژی بالا، از لحاظ هزینه موثر نیستند. پسماندهای جامد دارای کمبود نیتروژن و غنی از کربوهیدرات مانند سلولز [۴۲، ۴۱] و نشاسته [۴۳-۴۵] حاصل از پسماندهای

۳- اتانول

اتانول یکی از مهم‌ترین سوخت‌های زیستی مایع محسوب می‌شود و از سال ۱۸۹۶ به عنوان سوخت خودرو مورد استفاده قرار گرفته است، زمانی که هنری فورد اولین ماشین خود را که با اتانول خالص کار می‌کرد، طراحی نمود [۴۷]. اتانول را می‌توان در وسایل نقلیه پس از ترکیب با بنزین در نسبت‌های مختلف از ۵٪ تا ۱۰۰٪ اتانول (اتانول خالص) بکار برد. مزیت استفاده از اتانول به عنوان سوخت خودرو، این است که می‌توان آن را به طور مستقیم در خودروهای متداول تا مخلوطی با ۱۰ درصد اتانول (E۱۰) بکار برد، اما با افزایش نسبت اتانول، انجام برخی تغییرات (مانند پمپ سوخت) مورد نیاز است، با ترکیب بالاتر از E۲۵ نیاز به تغییرات موتور [۴۸] وجود دارد. مزایای دیگر استفاده از اتانول به عنوان سوخت این است که باعث افزایش عدد اکتان در مخلوط می‌شود (حتی مقادیر کوچک اتانول باعث افزایش قابل توجهی در عدد اکتان می‌شود) و محتوای اکسیژن بالاتر آن باعث بهبود کارایی احتراق می‌گردد [۴۷، ۴۹]. مهم‌تر از همه، استفاده از اتانول به عنوان سوخت موجب کاهش انتشار کربن مونوکسید، گوگرد اکسید، ترکیبات آلی فرار، ذرات ریز، بنزن و هیدروکربن‌ها می‌شود. برعکس، معایب استفاده از اتانول به عنوان سوخت این است که می‌تواند باعث افزایش انتشار نیتروژن اکسید، استالدئید، فرمالدئید و آکرولئین شود [۴۹]. علاوه بر این، اتانول انرژی کمتری نسبت به بنزین تولید می‌کند (۶۶ درصد انرژی بنزین را در بر دارد) [۵۰].

MSW ماده اولیه امیدبخشی برای تولید اتانول است و طی فرآوری اتانول، کربوهیدرات‌های MSW از جمله گلوکز، فروکتوز، نشاسته و سلولز می‌تواند به اتانول تبدیل شوند، در حالی که پروتئین‌ها و مواد معدنی موجود در MSW برای رشد میکروارگانیسم‌های تخمیر ضروری هستند.

مزایاها و محدودیت‌های تکنولوژی WTER

ارزیابی فناوری‌های WTER نشان می‌دهد که استفاده از پسماند، اقتصادی‌ترین فرآیند برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر (بیوگاز و هیدروژن / اتانول) و تمیز کردن محیط زیست است. بررسی این مطالعه نشان می‌دهد که بیوگاز، هیدروژن و اتانول می‌توانند به طور اقتصادی از پسماندهای تجدیدپذیر تولید شوند. مزیت افزوده پسماند و زیست توده به عنوان یک ماده تجدیدپذیر، این است که همیشگی هستند، و می‌تواند برای تولید بیوگاز،

هیدروژن و اتانول در صورت نیاز مورد استفاده قرار گیرد. مقدار قابل توجهی از پسماندهای تجدیدپذیر از بخش‌های کشاورزی، خانگی و صنعتی در سراسر جهان تولید می‌شود. این منبع غیر قابل استفاده می‌تواند منبع بالقوه تولید انرژی باشد اگر فناوری‌های مؤثر و اقتصادی برای بهره برداری از آن موجود باشد. محدودیت‌های متعددی برای توسعه سوبستراهای پسماند به عنوان یک منبع انرژی فوری وجود دارد. هم‌چنین فناوری‌های هضم بی‌هوازی در حال حاضر به اندازه کافی کارآمد نیستند تا انرژی مورد نیاز را با هزینه‌ای که قابل رقابت با فناوری‌های فسیلی باشد، بازیابی کند. بنابراین لازم است تا بهبود قابل ملاحظه‌ای در روش‌های تولید انرژی زیستی انجام شود [۲۴]. با در نظر گرفتن مزایای دیگری از جمله تبدیل پسماند یا کاهش گازهای گلخانه‌ای، می‌توان ارزش افزوده این فرآیند را از نظر اقتصادی ملموس‌تر کرد. عامل کلیدی دیگر در توسعه سوبستراهای پسماند تجدیدپذیر به عنوان منابع انرژی، چگونگی توزیع آن است. بسیاری از سوبستراهای پسماند اغلب در فاصله‌ای دور از سایت‌های بالقوه تولید انرژی قرار دارند. جمع‌آوری، حمل و نقل و دفع پسماندهای تجدیدپذیر نیز چالش‌های مهمی در استفاده از آن‌ها در تولید انرژی است. هزینه‌های این مواد اولیه به طور مستقیم با هزینه‌های جمع‌آوری و حمل و نقل به سایت‌های تولید انرژی مرتبط است. با توجه به اینکه منابع انرژی فسیلی در نهایت از بین می‌روند و به طور فزاینده‌ای گران‌تر می‌شوند، مسیرهای تبدیل پسماند به انرژی احتمالاً در آینده از جذابیت برخوردار خواهند بود. علاوه بر این، ارزیابی اجتناب از وقوع مشکلات زیست محیطی مربوط به باقی مانده پسماندها، مانند سایت‌های دفع پسماند‌های شهری و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند تاثیر پایداری WTER را مشخص کند.

پسماند صنعتی غنی از مواد آلی در مقادیر زیاد در مناطق شهری با نیازهای بالای انرژی تولید می‌شود که می‌تواند انرژی قابل استفاده را به طور پایدار برای برخی جوامع فراهم کند. مقادیر زیاد کودهای حیوانی از بخش‌های کشاورزی که نزدیک مراکز شهری و روستایی قرار دارند، تولید می‌شود که می‌تواند همراه با پسماندهای آلی جامد شهری برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گیرد و علاوه بر ارزش افزوده، باعث کاهش مشکلات زیست محیطی نیز شود. انرژی مورد نیاز برای پیش پردازش سوبسترا، تصفیه بیوگاز و هیدروژن، نگهداری راکتور، نیروی انسانی و غیره نیز تکنولوژی WTER را محدود کرده است. اگر چه

نتیجه گیری

در این مقاله، سودمندی تولید بیوگاز، هیدروژن و متانول از طریق استفاده از فناوری‌های میکروبی برای پسماندهای تجدیدپذیر در دسترس و دیگر منابع پسماند تجدیدپذیری که هنوز استفاده نشده‌اند نشان داده شده است. لزوم تحقیق و توسعه بیشتر در زمینه فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی و ایجاد انگیزه‌های تجاری برای تشویق توسعه صنعتی این فناوری بحث شده است. از این رو، با پیشرفت‌های علمی و مهندسی، محدودیت‌های فناوری‌های WTER می‌تواند حل شود و به عنوان یک مولفه کلیدی و پایدار اقتصادی تبدیل شود. این بررسی نشان می‌دهد که محصولات WTER در مقایسه با سوخت‌های فسیلی پتانسیل بالایی برای تولید محتوای انرژی بالا از طریق هضم بی-هوازی و تولید بیولوژیکی هیدروژن دارند. مطالعات تحقیقی برای بهبود وضعیت WTER جهت توسعه پایدار جامعه و تجاری‌سازی ضروری است. هیدروژن به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع انرژی در آینده شناخته شده است. زیست توده به طور بالقوه یک منبع انرژی قابل اطمینان برای تولید سوخت‌های زیستی به ویژه هیدروژن است. زیست توده قابل تجدید، فراوان و استفاده از آن آسان است. استفاده از زیست توده در آینده نقش مهمی در توسعه اقتصاد پایدار بازی می‌کند.

منابع

- [۱] IEA. *World energy outlook report 2016*. Int. Energy Agency, ۲۰۱۶.
- [۲] Arancon R.A.D., Lin C.S.K., Chan K.M., Kwan T.H., Luque R. *Energy Sci. Eng.* ۲۰۱۳, ۱, ۵۳-۷۱.
- [۳] ISWA. *ISWA key issue paper on waste prevention, waste minimization and resource management*. Int. Solid Waste Association, ۲۰۱۷.
- [۴] World Bank. *What a waste, a global review of solid waste management*, ۲۰۱۲.
- [۵] WHO/UNICEF. *Progress on sanitation and drinking-water*. Update WHO and UNICEF, France, ۲۰۱۳.
- [۶] Matsakas L., Rova U., Christakopoulos P. *BioResources* ۲۰۱۶, ۱۱, ۵۴۸۲-۹۹.
- [۷] Matsakas L., Christakopoulos P. *Sustainability* ۲۰۱۵, ۷, ۱۴۴۶-۵۸.
- [۸] Lino A.M., Ismail K.A.R., *Sustain Energy Technol. Assessment*. 2018, 29, 19-25.
- [۹] Pham T.P.T., Kaushik R., Parshetti G.K., Mahmood R., Balasubramanian R. *Waste Manag.* ۲۰۱۵, ۳۸, ۳۹۹-۴۰۸.
- [۱۰] Melikoglu M., Lin C., Webb C. *Open Eng.* ۲۰۱۳, ۳, ۱۵۷-۶۴.

با انتخاب و استفاده از ارگانیزم‌های مؤثرتر یا میکروارگانیسم‌های مخلوط، توسعه برنامه‌های پردازش کارآمدتر، بهینه‌سازی شرایط محیطی، بهبود بهره‌وری نورانی و ایجاد راکتورهای کارآمدتر در WTER، می‌توان بر بازده پایین و سرعت کم تولید انرژی مشکلات غلبه کند.

مقایسه تبدیل پسماند به بیوگاز، هیدروژن و اتانول

جزء آلی زباله‌های شهری که پس از تفکیک آن حاصل می‌شود غنی از مواد آلی گوناگون است که طی فرایند هضم بی‌هوازی قابلیت تبدیل شدن به بیوگاز را دارد [۵۱]. تولید بیوگاز بر روی طیف وسیعی از ترکیبات آلی به سادگی امکان‌پذیر است. محصول فرایند شامل حدود ۶۰٪ متان است که پس از فراوری می‌تواند به عنوان سوخت برای تولید حرارت و الکتریسیته مصرف شود.

بیوهیدروژن می‌تواند از طریق پیرولیز پسماندهای شهری تولید شود [۵۲ و ۵۳]. تبدیل موفقیت‌آمیز بیولوژیکی پسماند به هیدروژن شدیداً به پردازش پسماندها به گونه‌ای که بتوانند توسط میکروارگانیسم‌ها تخمیر شوند، بستگی دارد [۵۴]. باید توجه نمود که تولید بیوهیدروژن از بخش آلی پسماندها، راندمان بسیار پایینی دارد و محصولات جانبی که طی این فرایند تولید می‌شود، نیاز به روش‌های پیچیده جداسازی دارد [۵۵].

تولید اتانول تنها از پسماندهای جامدی که پایه کربوهیدراتی دارند مانند نشاسته یا سلولز مناسب است [۵۵]. فرایند تولید اتانول به گونه‌ای است که فقط جزء کربوهیدراتی پسماند پس از تبدیل شدن به قندهای ساده ۵ یا ۶ کربنه که طی فرایند پیش‌فراوری و هیدرولیز آنزیمی که هزینه زیادی در بردارد، توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف و اتانول تولید می‌شود. به عبارت دیگر سایر اجزاء آلی پسماند باید در ابتدا تفکیک و در فرایند مجزایی به بیوگاز تبدیل شوند.

با توجه به تفاوت هزینه تولید هیدروژن و متانول، تبدیل پسماند به هیدروژن معمولاً ارزان‌تر از تبدیل به متانول است [۵۶]. از سوی دیگر تولید متان از پسماند در مقایسه با تولید هیدروژن، هزینه کمتر و بازده بیشتری دارد. از این رو فرایند غالب در تولید انرژی از پسماند، تولید بیوگاز (متان) است. هر چند که با توجه به مزایای زیست محیطی، سهم سوخت‌های زیستی در بازار سوخت در دهه‌های آینده رشد چشمگیری خواهد داشت. رشد فناوری در آینده مسیرهای کم هزینه‌تری را برای تبدیل پسماند به انرژی در پیش روی بشر خواهد گذاشت.

- [۳۲] Cecchi F., Pavan P., Alvarez J.M., Bassetti A., Cozzolino C. *Waste Manag. Res.* ۱۹۹۱, ۹, ۳۰۵-۱۰.
- [۳۳] Del Borghi A., Converti A., Palazzi E., Del Borghi M. *Bioprocess Eng.* ۱۹۹۹, ۲۰, ۵۵۳-۶۰.
- [۳۴] Aslam M.U., Masjuki H.H., Kalam M.A., Abdesselam H., Mahlia T.M.I., Amalina M.A. *Fuel* ۲۰۰۶, ۸۵, ۷۱۷-۲۴.
- [۳۵] Zheng Y., Zhao J., Xu F., Li Y. *Prog. Energy Combust. Sci.* ۲۰۱۴, ۴۲, ۳۵-۵۳.
- [۳۶] Dong L., Zhenhong Y., Yongming S., Xiaoying K., Yu Z. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۹, ۳۴, ۸۱۲-۲۰.
- [۳۷] Vijayaraghavan K., Mohd Soom M.A. *Environ. Sci.* ۲۰۰۶, ۳, ۲۵۵-۷۱.
- [۳۸] Levin D.B., Pitt L., Love M. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۴, ۲۹, ۱۷۳-۸۵.
- [۳۹] Atif A.A.Y., Fakhru-Razi A., Ngan M.A., Morimoto M., Iyuke S.E., Veziroglu N.T. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۵, ۳۰, ۱۳۹۳-۷.
- [۴۰] Matsakas L., Gao Q., Jansson S., Rova U., Christakopoulos P., *Electron. J. Biotechnol.* 2017, 26, 69-83.
- [۴۱] Levin D.B., Sparling R., Islam R., Cicek N. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۶, ۳۱, ۱۴۹۶-۵۰۳.
- [۴۲] Magnusson L., Cicek N., Sparling R., Levin D.B. *Biotechnol. Bioeng.* ۲۰۰۹, ۱۰۲, ۷۵۹-۶۶.
- [۴۳] Yokoi H., Tokushige T., Hirose J., Hayashi S., Takasaki Y. *Biotechnol. Lett.* ۱۹۹۸, ۲۰, ۱۴۳-۷.
- [۴۴] Hussy I., Hawkes F.R., Dinsdale R., Hawkes D.L. *Biotechnol. Bioeng.* ۲۰۰۰, ۸۴, ۶۱۹-۲۶.
- [۴۵] Ren N., Li J., Li B., Wang Y., Liu S. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۶, ۳۱, ۲۱۴۷-۵۷.
- [۴۶] Veziroglu T.N., Barbir F. *Hydrogen energy technologies. Emerging technology series.* Vienna, Austria: UNIDO, ۱۹۹۸.
- [۴۷] Datta R., Maher M.A., Jones C., Brinker R.W. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* ۲۰۱۱, ۸۶, ۴۷۳-۸۰.
- [۴۸] The Royal Society. *Sustainable biofuels: Prospects and challenges.* Sustain. Biofuels ۲۰۰۸, ۱-۷۹.
- [۴۹] Niven R.K. *Renew Sustain. Energy Rev.* ۲۰۰۵, ۹, ۵۳۵-۵۵.
- [۵۰] Nigam P.S., Singh A. *Prog. Energy Combust. Sci.* ۲۰۱۱, ۳۷, ۵۲-۶۸.
- [۵۱] Marty D., Bonin P., Michoteyb V., Bianchia M. *Continental Shelf Res.* ۲۰۰۱, ۲۱, ۲۱۰۵-۱۵.
- [۵۲] Nath K., Das D. *Current Sci.* ۲۰۰۳, ۸۵, ۲۶۵-۷۱.
- [۵۳] Arni S. *Energy Educ. Sci. Technol.* ۲۰۰۴, ۱۳, ۴۷-۵۴.
- [۵۴] de Vrije T., de Haas G.G., Tan G.B., Claassen P.A.M. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۲, ۲۷, ۱۳۸۱-۹۰.
- [۵۵] Demirbas A. *Energy Convers Manag.* ۲۰۰۸, ۴۹, ۲۱۰۶-۲۱۱۶.
- [۵۶] Azar C., Lindgren K., Andersson B.A. *Energy Policy* ۲۰۰۳, ۳۱, ۹۶۱-۷۶.
- [۱۱] IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis report. *Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Switzerland: Geneva, ۲۰۱۵.
- [۱۲] Uckun Kiran E., Trzcinski A.P., Liu Y. *Fuel* ۲۰۱۴, ۱۳۴, ۳۸۹-۹۹.
- [۱۳] Reddy P.J. *Municipal solid waste management: processing, energy recovery, global examples.* BS Publications, India, ۲۰۱۱.
- [۱۴] Lin C.S.K., Pfaltzgraff L.A., Herrero-Davila L., Mubofu E.B., Abderrahim S., Clark J.H. *Energy Environ. Sci.* ۲۰۱۳, ۶, ۴۲۶-۶۴.
- [۱۵] World Bank. *Decision Makers' Guide to Municipal Solid Waste Incineration.* World Bank: Washington DC, ۱۹۹۹.
- [۱۶] Traore Alfred S. *Bioresource Technol.* ۱۹۹۲, ۴۱, ۱۰۵-۹.
- [۱۷] Nirmala B., Somayaji D., Khanna S. *Bioresource Technol.* ۱۹۹۶, ۵۸, ۷۳-۶.
- [۱۸] Lay J.J. *Biotechnol. Bioeng.* ۲۰۰۱, ۷۴, ۲۸۱-۷.
- [۱۹] Shin H.S., Youn J.H., Kim S.H. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۴, ۲۹, ۱۳۵۵-۶۳.
- [۲۰] Ginkel S.V., Oh S.E., Logan B.E. *Int. J. Hydrogen Energy* ۲۰۰۵, ۳۰, ۱۵۳۵-۴۲.
- [۲۱] Okamoto M., Miyahara T., Mizuno O., Noike T. *Water Sci. Technol.* ۲۰۰۰, ۴۱, ۲۵-۳۲.
- [۲۲] Meyer N.I., Benestad O., Emborg L., Selvig E. *Renew. Energy* ۱۹۹۳, ۳, ۱۲۷-۳۶.
- [۲۳] Panoutsou C., Eleftheriadis J., Nikolaou A. *Energy Policy* ۲۰۰۹, ۳۷, ۵۶۷۵-۸۶.
- [۲۴] Richa Kothari, V.V. Tyagi, A. Pathak, *Renew. Sustain. Energy Rev.* ۲۰۱۰, ۱۴, ۳۱۶۴-۳۱۷۰.
- [۲۵] Bouallagui H, Ben Cheikh R, Marounani, Hamdi M. *Bioresource Technol.* ۲۰۰۳, ۸۶, ۸۵-۹.
- [۲۶] Mataalvarez J., Mtzviturtia A., Llabresluengo P., Gecchi F. *Biomass Bioenergy.* ۱۹۹۳, ۵, ۴۸۱-۸.
- [۲۷] Pavan P., Battitoni P., Gecchi F., Mataalvarez J. *Water Sci. Technol.* ۲۰۰۰, ۴۱, ۱۱۱-۸.
- [۲۸] Papurello D., Soukoulis C., Schuhfried E., Cappellin L., Gasperi F., Silvestri S. *Bioresour. Technol.* ۲۰۱۲, ۱۲۶, ۲۵۴-۶۵.
- [۲۹] Matsakas L., Rova U., Christakopoulos P. *Front Microbiol.* ۲۰۱۵, ۶, ۱-۱۰.
- [۳۰] Nitsos C., Matsakas L., Triantafyllidis K., Rova U., Christakopoulos P., Nitsos C. *Biomed. Res. Int.* ۲۰۱۵, ۲۰۱۵, ۱-۶.
- [۳۱] Xia Y., Fang H.H.P., Zhang T. *RSC Adv.* ۲۰۱۳, ۳, ۱۵۵۲۸-۴۲.