

# مروری بر هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد شهری برای بازیابی مواد و انرژی

مهسا مسجودی<sup>۱</sup>، جلال شایگان<sup>۲\*</sup>، آزاده بابایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۳- پسادکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

پیام‌نگار: shayegan@sharif.edu

## چکیده

هضم بی‌هوازی یکی از روش‌های تصفیه و مدیریت پسماندهای جامد آلی بوده و به‌عنوان راهکاری به‌منظور بازیابی ماده و انرژی از پسماند به‌شمار می‌رود. هدف از این مقاله، بررسی جامع فرایند هضم بی‌هوازی از جنبه‌های مختلف می‌باشد. در ابتدا، مهم‌ترین واکنش‌های زیست‌شناسانه دخیل در فرایند هضم بی‌هوازی، راهکارهایی جهت بهبود بازدهی فرایند و انواع واکنشگاه (راکتور) مناسب مورد بحث قرار گرفته‌اند. در نهایت امکان انجام هضم بی‌هوازی برای مدیریت پسماندها در ایران به‌طور اجمالی بررسی شده‌اند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، با استفاده از روش پیش‌تصفیه گرمایی به‌همراه افزودن مواد قلیایی و سیستم‌های واکنشگاه دو/چندمرحله‌ای و ایجاد تغییرات در شرایط عملیاتی، می‌توان بازده فرایند هضم بی‌هوازی پسماند را افزایش داد، از طرفی، با توجه به این‌که بخش زیادی از پسماند تولیدی در ایران شامل پسماندهای تجزیه‌پذیر است، هضم بی‌هوازی یک فرایند مناسب برای دفع پسماندهای شهری در ایران تلقی می‌گردد که می‌توان از زیست‌گاز تولیدی و مواد هضم‌شده آن استفاده نمود.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۰۵

شماره صفحات: ۵۸ تا ۷۸

## کلیدواژه‌ها: بازیابی مواد و

انرژی، زیست‌گاز، پسماند جامد

شهری، هضم بی‌هوازی

## ۱. مقدمه

شده‌است. طی دهه‌های اخیر، دفن بهداشتی پسماند در خاکچال‌ها<sup>۴</sup> به دلیل سادگی و صرفه اقتصادی بسیار رایج بوده، اما بدیهی است که این کار باعث آسیب‌رسانی به محیط‌زیست، از بین رفتن بخش زیادی از منابع با ارزش موجود در پسماند و افزایش هزینه‌های تصفیه شیرابه خواهد شد. این در حالی است که بازیابی مواد و انرژی

امروزه با رشد روزافزون جمعیت و افزایش آگاهی در زمینه محیط‌زیست و بهداشت عمومی، حذف پسماندهای آلی جامد معضلی جهانی شمرده می‌شود. به‌منظور مدیریت پسماند راهکارهایی از قبیل استفاده مجدد<sup>۱</sup>، بازیابی منابع<sup>۲</sup> و بازیافت<sup>۳</sup> ارائه

\* تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

3. Recycle  
4. Landfill

1. Reuse  
2. Recovery

نظیر زیست‌گاز<sup>۵</sup> (متان، کربن‌دی‌اکسید، هیدروژن سولفید و آمونیاک) و ترکیبات آلی غنی از انرژی (زیست‌توده<sup>۶</sup> باکتریایی جدید) تبدیل نماید. برخی از موادی که می‌توانند به‌عنوان خوراک در فرایند هضم بی‌هوازی به‌کار روند، عبارتند از [۴]:

- فضولات حیوانات
- پسماندها و محصولات جانبی کشاورزی، باغداری و جنگلداری
- پسماند حاصل از پرورش آبزیان، شکار و ماهیگیری
- پسماندهای آلی و قابل هضم به‌دست آمده از آماده‌سازی و فرآوری مواد غذایی
- پسماند به‌دست آمده از صنایع چوب و کاغذ
- پسماند به‌دست آمده از صنایع چرم و پارچه
- بخش آلی پسماندهای شهری (شامل پسماندهای خانگی و پسماندهای صنعتی و تجاری مشابه)
- لجن فاضلاب

جمعیت متنوعی از میکروارگانیسم‌ها طی برخی از واکنش‌های سوخت‌وسازی از جمله آب‌کافت (هیدرولیز)<sup>۷</sup>، اسیدسازی<sup>۸</sup> (تخمیر<sup>۹</sup>) و متان‌سازی<sup>۱۰</sup>، فرایند تبدیل این پسماندهای آلی را به محصولات نهایی انجام می‌دهند [۲].

## ۲-۱ آب‌کافت (هیدرولیز)

در مرحله آب‌کافت، زیمایه‌های (آنزیم‌های) خارج سلولی، بسپارهای آلی کمپلکس را - از جمله پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و لیپیدها - به محصولات محلول تبدیل می‌کند تا اندازه مولکول این محصولات تا حد کافی کاهش یابد و بتوانند از غشاء سلولی باکتری‌ها عبور نمایند. از آنجایی که فرایند آب‌کافت نسبتاً آهسته و نیازمند صرف انرژی زیادی است، می‌توان آن را به‌عنوان مرحله محدودکننده در فرایند هضم بی‌هوازی در نظر گرفت [۵].

## ۲-۲ اسیدسازی (تخمیر)

پس از عبور تکپارهای (مونومر) تولیدشده در مرحله آب‌کافت از

از پسماند، منجر به کاهش حجم پسماندهای دفن شده در خاکچال‌ها، کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از پسماند، استفاده کمتر از منابع انرژی طبیعی و کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌گردد. به‌طور کلی، پسماند جامد آلی به ضایعات آلی زیست‌تخریب‌پذیری با اطلاق می‌گردد که میزان رطوبت آن‌ها کمتر از ۹۰-۸۵٪ باشد؛ با توجه به این تعریف، بسیاری از پسماندهای کشاورزی، غذایی، صنعتی و نیز لجن‌های حاصل از فاضلاب شهری در این دسته قرار می‌گیرند [۱]. روش هضم بی‌هوازی یکی از سودمندترین روش‌های فرآوری و تصفیه بخش آلی پسماندهای جامد شهری<sup>۱</sup> می‌باشد. این فرایند دربرگیرنده مجموعه‌ای از واکنش‌های سوخت‌وسازی است که می‌توانند به‌طور طبیعی در خاکچال‌ها رخ دهند؛ اما در این صورت با آزادسازی مواد مضر برای محیط‌زیست - از جمله شیره و گازهای مختلف، نظیر متان و دی‌اکسیدکربن، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی<sup>۲</sup>، آمونیاک و اسیدهای چرب فرار<sup>۳</sup> - همراه خواهند بود. از طرفی با انجام این فرایند تحت شرایط کنترل‌شده، می‌توان محصولات باارزشی مانند سوخت زیستی<sup>۴</sup> و مواد اصلاح‌کننده خاک (کمپوست) تولید نمود [۲ و ۳].

از مزایای فرایند بی‌هوازی نسبت به فرایندهای هوازی می‌توان به نیاز به انرژی کمتر و تولید زیست‌توده کمتر اشاره کرد؛ همچنین هضم بی‌هوازی می‌تواند آلودگی محیط‌زیست را از دو جهت کاهش دهد: محیط پوشیده این فرایند از خروج گاز متان به اتمسفر جلوگیری می‌کند؛ این درحالی‌است که در فرایند هوازی انتشارات غیرقابل کنترل و زیادی از ترکیبات فرار نظیر کتون‌ها، آلدئیدها، آمونیاک و متان متصاعد می‌گردد [۱].

با توجه به کارایی فرایند هضم بی‌هوازی به‌عنوان روشی عملی برای مدیریت پسماندهای جامد شهری و بازیابی مواد و انرژی، در این مقاله سعی بر آن است تا مروری بر جنبه‌های مختلف این فرایند و بازیابی مواد و انرژی از آن صورت گیرد.

## ۲. هضم بی‌هوازی

فرایند هضم بی‌هوازی در غیاب اکسیژن و طی یک مسیر زیست‌شناسانه می‌تواند تقریباً هر نوع پسماند آلی را به محصولاتی

5. Biogas  
6. Biomass  
7. Hydrolysis  
8. Acidogenesis  
9. Fermentation  
10. Methanogenesis

1. Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)  
2. Chemical Oxygen Demand (COD)  
3. Volatile Fatty Acids (VFA)  
4. Biofuel

تا چندصدبار افزایش یافته و سپس با کاهش ناگهانی فشار، ذرات همگن سازی می شوند. خلأ ایجاد شده باعث افزایش انرژی درونی می گردد که غشاهای سلولی را تخریب می نماید. البته دو روش مذکور در مورد فضولات و لجن تصفیه خانه های فاضلاب به کار می روند. در بین روش های پیش تصفیه مکانیکی موجود، کاربرد موفقیت آمیز استوانه دوار<sup>۷</sup>، پرس پیچشی<sup>۸</sup>، خردکننده غربالی دیسکی<sup>۹</sup> و پرس پیستونی<sup>۱۰</sup> در صنعت اثبات شده است (شکل (۱)) [۶].

برخی از مزایای فرایندهای پیش تصفیه مکانیکی عبارت است از: تولید نکردن بو، کاربرد آسان، آگیری بهتر از مواد هضم شده و مصرف انرژی متوسط. معایب این فرایندها نیز؛ تأثیر کمتر بر حذف پاتوژن ها، امکان انسداد تجهیزات و ایجاد رسوب می باشد [۶].

### ۳-۲ پیش تصفیه گرمایی

پیش تصفیه گرمایی یکی از روش های پر کاربرد صنعتی بوده که منجر به حذف پاتوژن ها، بهبود عملیات آب زدایی و کاهش گرانروی (ویسکوزیته) مواد هضم شده می گردد و بدین ترتیب کار با مواد هضم شده را آسان تر می سازد. در این فرایند، حرارت دهی از طریق بخار، گرم کن الکتریکی و یا گرمادهی با ریزموج ها امکان پذیر است [۶ و ۷]. افزایش دما باعث فروپاشی غشاهای سلولی و افزایش حلالیت ترکیبات آلی می شود. اثرات فرایند پیش تصفیه گرمایی وابسته به نوع خوراک و محدوده دمای عملیاتی است؛ مثلاً در مورد خوراک های حاوی مواد لیگنوسلولزی، دماهای بیشتر از ۱۶۰ °C علاوه بر افزایش حلالیت همی سلولز، باعث حلالیت لیگنین نیز خواهد شد و ترکیبات حاصل از این فرایند عموماً ترکیبات فنولی هستند که از مواد بازدارنده برای تکثیر باکتری های بی هوازی به شمار می روند. علاوه بر این، استفاده از دماهای زیاد (> ۱۷۰ °C) در پیش تصفیه گرمایی نیز می تواند منجر به تشکیل پیوندهای شیمیایی بین مواد و نهایتاً تجمع ذرات درون واکنشگاه گردد. از طرفی، دماهای پایین (< ۱۰۰ °C) باعث تجزیه مولکول های پیچیده نخواهد شد؛ اما می تواند منجر به جدایی لخته های حاصل از درشت مولکول ها شود. علاوه بر واکنش های شیمیایی مذکور، با افزایش دما میزان مواد آلی فرار کاهش یافته و/یا قابلیت تولید متان زیستی از مواد زیست تخریب پذیر افزایش می یابد [۶].

غشاء سلولی باکتری ها، جمعیت متنوعی از باکتری های بی هوازی اختیاری و اجباری می توانند این تکپارها را از طریق مسیرهای تخمیری گوناگون تجزیه کنند و محصولاتی از قبیل کربن دی اکسید، گاز هیدروژن، الکل ها، اسیدهای آلی، ترکیبات نیتروژنی آلی و ترکیبات گوگردی آلی تولید نمایند. استات را می توان مهم ترین اسید آلی تولید شده در این مرحله دانست؛ زیرا می تواند مستقیماً به عنوان خوراک باکتری های متان ساز مورد استفاده قرار گیرد [۵].

### ۳-۲ متان سازی

در آخرین مرحله باکتری های متان ساز، گاز متان تولید می نمایند. با فعالیت باکتری های استوکلاستیک<sup>۱</sup> و حذف گروه کربوکسیل از استات، حدود ۶۶٪ از گاز متان تولید شده، در این مرحله به دست می آید. ۳۴٪ دیگر از گاز متان تولیدی ناشی از واکنش کاهش کربن دی اکسید توسط هیدروژن می باشد که در آن باکتری های مصرف کننده هیدروژن<sup>۲</sup> (هیدروژن دوست<sup>۳</sup>) نقش کاتالیزور را ایفا می نمایند [۵].

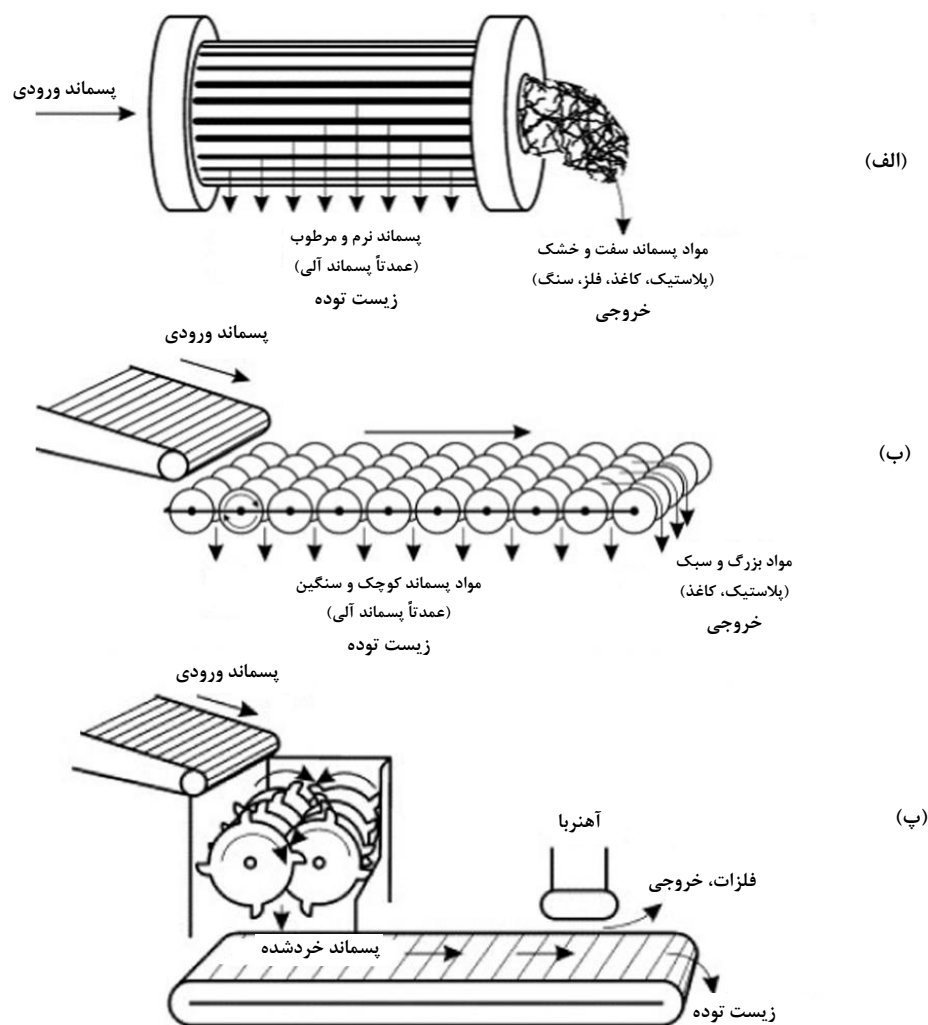
### ۳-۲ روش های بهبود هضم بی هوازی پسماندهای آلی جامد

#### ۳-۱-۱ پیش تصفیه مکانیکی

در پیش تصفیه مکانیکی با تجزیه/ خرد شدن ذرات جامد موجود در خوراک، ترکیبات موجود در سلول آزاد شده، سطح ویژه افزایش می یابد و بدین ترتیب، زمینه برخورد بهتر بین خوراک و باکتری های بی هوازی فراهم خواهد شد که منجر به بهبود تولید زیست گاز می گردد (۱۸-۳۶٪ افزایش در تولید زیست گاز). برخی از فرایندهای مختلف پیش تصفیه مکانیکی شامل فرستادن امواج صوتی<sup>۵</sup> و همگن سازی (هموژنیزه) تحت فشار بالا<sup>۶</sup> است [۶ و ۷]. مثلاً، برای ایجاد امواج صوتی از یک میله مرتعش استفاده می شود؛ در این فرایند، علاوه بر کاهش اندازه ذرات در بسامدهای (فرکانس) پایین (۲۰-۴۰ kHz)، در بسامدهای بالا نیز رادیکال هایی از جمله  $\text{OH}^*$ ،  $\text{H}_2\text{O}^*$  و  $\text{H}^*$  تولید می گردند که به اکسید کردن مواد جامد کمک می نمایند. همچنین، در فرایند همگن سازی زیر فشار بالا، ابتدا فشار

1. Acetoclastic Methanogenic Bacteria
2. Hydrogen Utilizing Methanogenic Bacteria
3. Hydrogenophilic
4. Pre-Treatment
5. Sonication
6. High-Pressure Homogenizer (HPH)

7. Rotary Drum
8. Screw Press
9. Disk Screen Shredder
10. Piston press



شکل ۱. روش‌های پیش‌تصفیه مکانیکی برای بهبود هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی جامد: (الف) پرس پیچشی؛ (ب) غربال دیسکی؛ (پ) خردکننده مجهز به آهنربا [۶].

می‌آورند. برخلاف مواد مذکور، به‌کارگیری روش پیش‌تصفیه شیمیایی برای مواد غنی از لیگنین، بسیار مؤثر خواهد بود [۸-۶]. در صورت استفاده از مواد قلیایی در پیش‌تصفیه شیمیایی، افزایش حلالیت و وقوع واکنش صابونی‌شدن، منجر به تورم ذرات جامد می‌گردد. بدین ترتیب، سطح ویژه افزایش یافته و مواد مغذی به‌راحتی در دسترس میکروب‌های بی‌هوازی قرار می‌گیرند. نکته قابل توجه در مورد پیش‌تصفیه قلیایی آن است که بخشی از مواد قلیایی توسط خود زیست‌توده به مصرف می‌رسد؛ بنابراین برای دستیابی به مقدار پیش‌تصفیه مطلوب، ممکن است به مقدار بیشتری از واکنشگرهای قلیایی نیاز باشد [۶].

### ۳-۳ پیش‌تصفیه شیمیایی

در پیش‌تصفیه شیمیایی برای تخریب ترکیبات آلی، بهبود تولید زیست‌گاز و افزایش نرخ آب‌کافت، از اسیدهای قوی، بازها و مواد اکسیدکننده‌ای مانند ازن، استفاده می‌شود. از آنجایی که عموماً برای تنظیم pH در هضم بی‌هوازی باید از قلیا استفاده نمود، پیش‌تصفیه شیمیایی با افزودن مواد قلیایی ترجیح داده می‌شود. در مورد موادی با زیست‌تخریب‌پذیری بالا و موادی که حاوی مقادیر زیاد کربوهیدرات می‌باشند، استفاده از پیش‌تصفیه شیمیایی به‌دلیل تجزیه سریع مواد و تجمع اسیدهای چرب فرار<sup>۱</sup> مناسب نیست؛ زیرا این محصولات از پیشرفت مرحله متان‌سازی جلوگیری به‌عمل

1. Volatile Fatty Acid (VFA)

سرسخت به ترکیبات زیست تخریب پذیرتری تبدیل می‌شوند و در دسترس باکتری‌های بی‌هوازی قرار می‌گیرند [۶].

### ۳-۴ پیش تصفیه زیست‌شناختی

پیش تصفیه زیست‌شناختی شامل استفاده از روش‌های هوازی و بی‌هوازی و نیز افزودن زیمايه‌های خاص نظیر پیتیداز، کربوهیدرولاز و لیپاز به سیستم می‌باشد. این روش عمدتاً بر روی لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و صنایع کاغذ انجام می‌شود [۶]. در فرایندهای پیش تصفیه زیست‌شناختی، استفاده از گونه‌های میکروبی خاص مزایای متعددی به دست می‌دهد که از جمله آن‌ها می‌توان به هزینه سرمایه‌گذاری کم، انرژی کم، بی‌نیازی به مواد شیمیایی، شرایط محیطی ملایم و تشکیل نشدن ترکیبات بازدارنده اشاره نمود. ایراد اصلی روش‌های زیست‌شناختی، کم بودن نرخ آب‌کافت در مقایسه با سایر فرایندها می‌باشد [۸]. در جدول (۱)، مقایسه‌ای کیفی بین انواع روش‌های پیش تصفیه (گرمایی، مکانیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی) از لحاظ بازده تولید گاز متان، هزینه و انرژی مصرفی، تأثیر بر محیط‌زیست و شاخص‌های کنترلی فرایند صورت گرفته است.

جدول ۱. مقایسه انواع روش‌های پیش‌تصفیه فرایند بی‌هوازی [۹ و ۶].

شاخص‌های کنترلی فرایند	دوستدار محیط‌زیست	انرژی و هزینه مورد نیاز	بازده	نوع پیش تصفیه
• دما • زمان تماس	+++	+	+	دما پایین
• دما • زمان تماس	+++	+++	+++	دما بالا
• توان • زمان تماس • فشار (در فرایند همگن سازی کردن)	+	++	+++	مکانیکی
• دوز مواد شیمیایی • زمان تماس	+	+	+++	شیمیایی
• دوز زیمايه (در فرایند آنزیمی) • زمان تماس • دما • pH	+++	+++	+	زیست شناختی

### ۳-۵ هضم بی‌هوازی ترکیبی<sup>۱</sup>

هضم بی‌هوازی ترکیبی یا تخمیر ترکیبی<sup>۲</sup> عبارت است از اختلاط پسماندهای مختلف با یکدیگر و استفاده از آن‌ها به عنوان خوراک هاضم بی‌هوازی. از مزایای این روش می‌توان به رقیق‌سازی ترکیبات سمی، افزایش بار مواد آلی زیست‌تخریب‌پذیر، بهبود تعادل مواد مغذی موجود، افزایش بازدهی تولید زیست‌گاز، افزایش نرخ هضم و تثبیت مواد و فراهم کردن رطوبت موردنیاز در خوراک هاضم اشاره کرد<sup>[۲]</sup>. البته، معایبی نیز در این فرایند وجود دارد که عمدتاً ناشی از هزینه‌های بالای انتقال دوغاب و مشکلات هماهنگ‌سازی مقررات مختلف تولیدکنندگان پسماند است<sup>[۱]</sup>.

در این زمینه تحقیقات زیادی از طریق هضم بی‌هوازی مخلوطی از پسماندهای کشاورزی، شهری و صنعتی صورت گرفته است. آگداگ و اسپونزا (۲۰۰۷) مشاهده کردند که هضم ترکیبی پسماند جامد شهری با لجن صنعتی با نسبت ۱:۲ در مقایسه با هضم پسماند جامد شهری به تنهایی، منجر به حصول بیشترین بازدهی گاز متان می‌گردد<sup>[۱۰]</sup>. به‌طور مشابه، فزانی و شیخ (۲۰۱۰) در یک سیستم هضم بی‌هوازی دوفازی با استفاده از هضم ترکیبی مخلوطی از فاضلاب آسیاب زیتون و پسماند جامد آسیاب زیتون، بیشترین تولید متان را به‌دست آوردند و محصول هضم‌شده می‌توانست به‌عنوان کود اصلاح‌کننده خاک مورد استفاده قرار گیرد<sup>[۱۱]</sup> و<sup>[۲]</sup>. در مطالعه دیگری، روشنی و همکاران (۱۳۹۱) هضم بی‌هوازی ترکیبی مخلوطی از پسماند مرغداری و گاو را (با تنظیم کردن نسبت کربن به نیتروژن) بررسی کردند که در این شرایط ۰/۱۲ متر مکعب گاز متان به‌ازای یک کیلوگرم مواد فرار تولید شد<sup>[۱۲]</sup>.

باوجود برتری‌های یادشده برای فرایند هضم بی‌هوازی ترکیبی و نیز تحقیقات بسیاری که در این زمینه صورت گرفته، این فرایند به‌طور گسترده به صنعت راه نیافته است. افزودن مقادیر کمی از یک خوراک کمکی<sup>۳</sup> جامد آلی به هاضم‌های فضولات بسیار رایج است؛ اما معمولاً این خوراک‌ها به شکل لجن‌های صنعتی با بازدهی انرژی بالا هستند و به‌ندرت از پسماند جامد خانگی یا پسماندهای بازاری برای این کار استفاده می‌شود، زیرا پسماند جامد اصولاً نیازمند فرآوری و پیش‌فرآوری خاصی است. همچنین، معمولاً پسماندهای جامد منجر به آلودگی فضولات با انواع مختلفی از فلزات سنگین و

ناخالصی‌هایی می‌شوند که به‌طور طبیعی در محیط فضولات یا لجن وجود ندارند. افزودن فضولات یا لجن به هاضم‌های پسماند جامد نیز به‌دلایل اقتصادی، بسیار محدود می‌باشد و همچنین پسماند مایع باعث تولید فاضلابی خواهد شد که نیازمند تصفیه مجدد است<sup>[۱۳]</sup>.

### ۴. واکنشگاه‌های مورد استفاده در هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد آلی

زیست‌واکنشگاه (بیو-رآکتور) یا هاضم‌های مورد استفاده در هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد آلی، بر چند اساس قابل طبقه‌بندی است: (۱) مقدار رطوبت موجود در خوراک (هضم مرطوب یا خشک)، (۲) روش خوراک‌دهی (خوراک‌دهی پیوسته<sup>۴</sup>: تک‌مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و خوراک‌دهی ناپیوسته<sup>۵</sup>): (۳) دمای فرایند هضم (هضم گرمادوست<sup>۶</sup> یا میانه‌دوست<sup>۷</sup>) و (۴) تعداد فازهای موجود (تک‌فازی و دوفازی)<sup>[۵]</sup>.

#### ۴-۱ هضم بی‌هوازی خشک و مرطوب

طبق تعریف، چنانچه غلظت کل جامدات<sup>۸</sup> موجود در خوراک کمتر از ۱۵٪ باشد، فرایند از نوع تخمیر مرطوب است و اگر غلظت جامدات موجود در خوراک به ۴۰-۲۰٪ برسد، هضم بی‌هوازی از نوع خشک خواهد بود<sup>[۵]</sup> و<sup>[۱۴]</sup>. در مواردی که درصد جامدات موجود در خوراک، بین دو محدوده فوق‌الذکر قرار گیرد، هضم نیمه‌خشک نامیده می‌شود<sup>[۲]</sup>.

در فرایند هضم بی‌هوازی مرطوب، باید با افزودن آب، ایجاد جریان چرخشی شیرابه و یا به‌کارگیری هضم بی‌هوازی ترکیبی، غلظت جامدات را در حد مطلوبی نگه‌داشت. بدین‌منظور عموماً از واکنشگاه‌های پیوسته کاملاً مخلوط<sup>۹</sup> دارای همزن‌های مکانیکی و یا ترکیبی از همزن و مجرای تزریق زیست‌گاز استفاده می‌شود. از مزایای فرایند هضم مرطوب می‌توان به رقیق‌سازی ترکیبات بازدارنده با افزودن آب و نیاز به تجهیزات مکانیکی ساده اشاره نمود؛ اما برخی از معایب این فرایند عبارت است از: پیچیدگی فرایند پیش‌تصفیه، مصرف زیاد آب و انرژی برای حرارت‌دهی و کاهش حجم مفید هاضم به‌دلیل ته‌نشین شدن مواد بی‌اثر<sup>[۵]</sup>.

4. Continuous  
5. Batch  
6. Thermophilic  
7. Mesophilic  
8. Total Solid (TS)  
9. Continuous Stirred Tank Reactors (CSTR)

1. Co-Digestion  
2. Co-Fermentation  
3. Co-Substrate

محبوبیت زیادی رسیده‌اند [۵]. اصلی‌ترین ایراد هاضم‌های ناپیوسته تولید نایک‌نواخت زیست‌گاز و پایداری کم جمعیت میکروبی می‌باشد [۷].

با توجه به اینکه فرایند هضم بی‌هوازی خود متشکل از چند فرایند مجزا از جمله آب‌کافت، اسیدسازی و متان‌سازی می‌باشد، سیستم‌های هضم پیوسته را می‌توان به سیستم‌های تک‌مرحله‌ای و دو/چند مرحله‌ای طبقه‌بندی نمود. در سیستم‌های تک‌مرحله‌ای پیوسته، تمام فرایندهای زیست‌شیمیایی مذکور به‌طور هم‌زمان و درون یک واکنش‌گاه رخ می‌دهند (شکل (۲)). گروه‌های میکروبی موجود در هریک از واکنش‌ها دارای نرخ رشد متفاوتی هستند و به شرایط بهینه‌ای از نظر دما و pH نیاز دارند؛ اما از آنجا که در فرایند تک‌مرحله‌ای تمام واکنش‌ها باید در شرایط یکسانی رخ دهند، این مسأله باعث می‌شود که در مقایسه با سیستم‌های چندمرحله‌ای، عملکرد سیستم‌های تک‌مرحله‌ای به‌راحتی دچار اختلال شود. در سیستم‌های دو/چند مرحله‌ای، با در نظر گرفتن واکنش‌گاه جداگانه برای هریک از مراحل هضم می‌توان شرایط هضم را بهینه‌سازی نمود (شکل (۳)). یکی از معایب عمده سیستم‌های هضم بی‌هوازی دو/چند مرحله‌ای، کاهش بازدهی تولید زیست‌گاز است که ناشی از حذف ذرات جامد از خوراک ورودی به مرحله دوم می‌باشد. به‌نظر می‌رسد که سیستم‌های دو/چند مرحله‌ای بتوانند باعث افزایش نرخ تبدیل مواد و استفاده از محدوده وسیع‌تری از مواد زیستی شوند؛ اما با وجود این برتری، کاربرد چنین سیستم‌هایی در صنعت محدود است؛ زیرا سیستم‌های تک‌مرحله‌ای دارای طراحی ساده‌تر، احتمال خرابی کمتر و هزینه سرمایه‌گذاری کمتری می‌باشند. همچنین، در صورتی که طراحی سیستم‌های تک‌مرحله‌ای به‌خوبی انجام شود و شرایط عملیاتی آن‌ها به‌دقت انتخاب گردد، عملکرد این واکنش‌گاه‌ها برای اغلب پسماندهای آلی با عملکرد سیستم‌های دو/چند مرحله‌ای قابل‌مقایسه خواهد بود [۵].

#### ۳-۴ هضم بی‌هوازی میانه‌دوست و گرمادوست

ریزجاندارانی که عمل هضم بی‌هوازی را انجام می‌دهند می‌توانند از نوع میانه‌دوست (فعال در دمای محیط - ۳۵-۴۰ °C) و یا گرمادوست (۵۰-۵۵ °C) باشند؛ بنابراین، دمای عملیات هضم می‌تواند اثر زیادی بر میزان تبدیل مواد، پویایی (کینتیک)، پایداری،

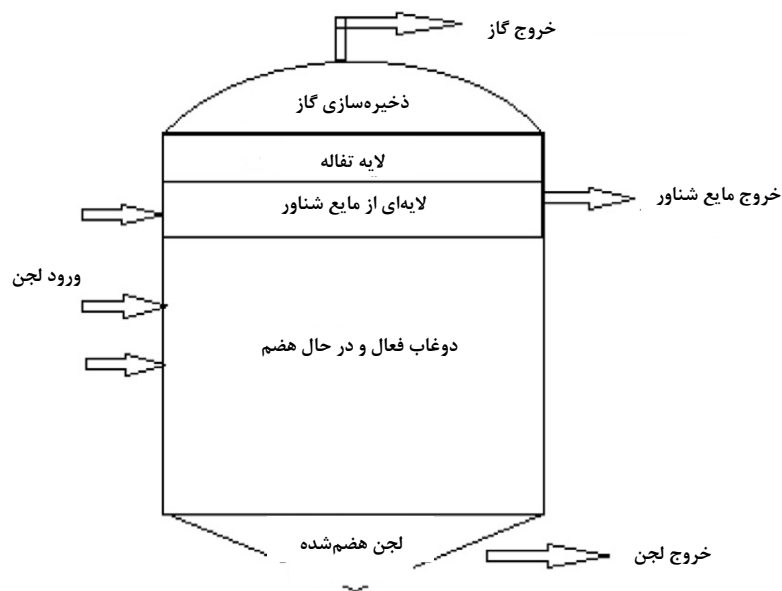
در اغلب واکنش‌گاه‌های مورد استفاده برای هضم بی‌هوازی خشک، از هم‌زن‌های مکانیکی استفاده نمی‌شود و عموماً عمل اختلاط با تزریق زیست‌گاز صورت می‌گیرد. اما در این روش، محتویات هاضم به‌طور کامل مخلوط نمی‌شود؛ در نتیجه تماس کافی بین خوراک و ریزاندام‌ها برقرار نخواهد شد. بدین ترتیب، هاضم‌های مورد استفاده در هضم بی‌هوازی خشک را می‌توان از نوع واکنش‌گاه لوله‌ای<sup>۱</sup> در نظر گرفت. اگرچه فرایند هضم بی‌هوازی خشک نیاز به مراحل پیش‌تصفیه پیچیده ندارد و نرخ بارگذاری آلی بیشتری به‌دست می‌دهد، اما این فرایند نیازمند تجهیزات مکانیکی پیچیده‌ای است و امکان رقیق‌سازی مواد بازدارنده در آن وجود ندارد [۵]. به‌طور کلی ظرفیت فرایند هضم بی‌هوازی خشک، نسبت به هضم بی‌هوازی مرطوب بیشتر است؛ اما مشاهده شده‌است که نیم‌رخ تولید زیست‌گاز در هر دو فرایند خشک و مرطوب یکسان می‌باشد [۵ و ۱۴].

#### ۲-۴ هضم بی‌هوازی با سیستم خوراک‌دهی پیوسته و ناپیوسته

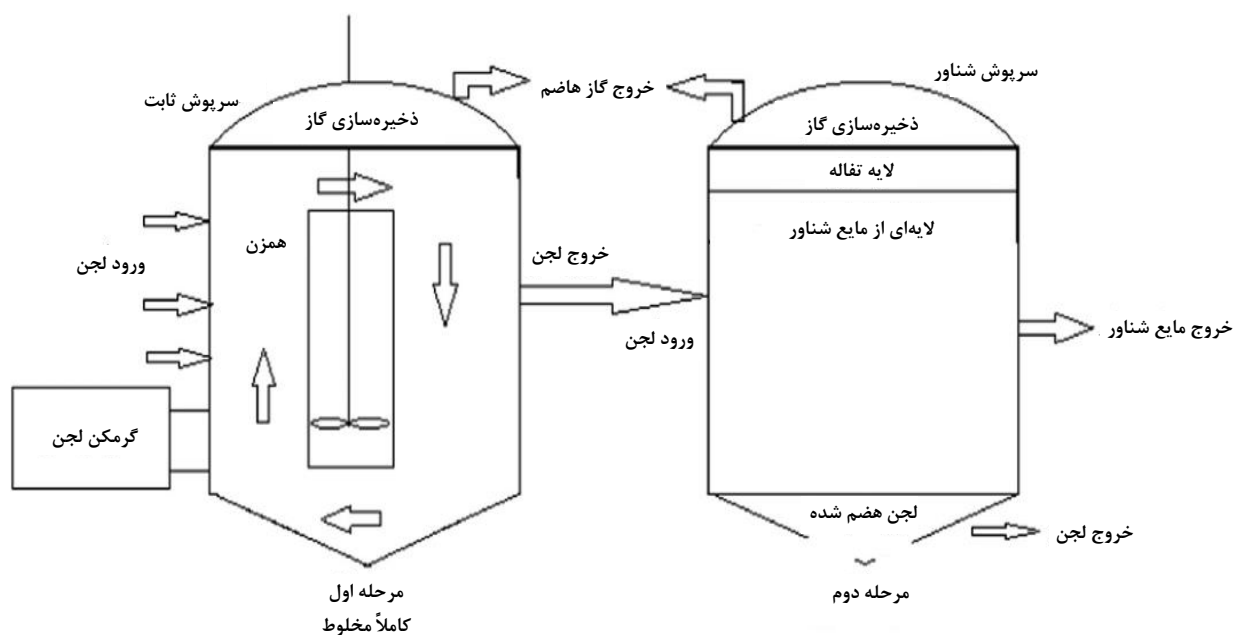
در سیستم‌های ناپیوسته، هاضم به یکباره با خوراک تازه پر می‌شود، سپس با بسته‌شدن محفظه و سپری شدن زمانی برابر با زمان اقامت واکنش‌گاه، محصولات هضم از درون واکنش‌گاه خارج می‌شوند. در سیستم‌های پیوسته، خوراک تازه به‌طور پیوسته وارد واکنش‌گاه می‌شود و به‌همان میزان، محصولات هضم نیز از واکنش‌گاه خارج می‌گردند [۵].

در مقایسه با خاکچال‌ها، نرخ تولید زیست‌گاز در سیستم‌های ناپیوسته بیشتر است و این امر ناشی از دو ویژگی اساسی در چنین سیستم‌هایی می‌باشد: (۱) چرخش مداوم شیرابه علاوه‌بر پراکنده‌سازی ماده تلقیحی ریزجاندارها، مواد غذایی و اسیدهای تولیدی، باعث بهبود شرایط اختلاط نیز می‌گردد؛ (۲) دمای عملیاتی در سیستم‌های ناپیوسته معمولاً بیشتر از دمای خاکچال‌هاست. اگرچه سیستم‌های ناپیوسته سهم چشمگیری در بازار کشورهای توسعه‌یافته نداشته‌اند، اما به‌دلیل دارا بودن مزایایی چون بی‌نیازی از خرد کردن پسماند، بی‌نیازی از تجهیزات اختلاط و هم‌زن‌های پیچیده و یا بی‌نیازی از مخازن گران‌قیمت و تحت‌فشار، دارای هزینه سرمایه‌گذاری کمی هستند؛ در نتیجه در کشورهای در حال توسعه به

1. Plug Flow Reactor



شکل ۲. شکل‌واره‌ای از فرایند هضم بی‌هوازی در واکنشگاه پیوسته تک‌مرحله‌ای [۷].



شکل ۳. شکل‌واره‌ای از فرایند هضم بی‌هوازی در واکنشگاه پیوسته دو/چند مرحله‌ای [۷].

(پاتوژن) می‌گردد [۱۶]. اصلی‌ترین ایراد فرایندهای گرمادوست هزینه‌های بالاتر برای گرمایش و نیز اتلاف گرما از طریق محصولات هضم می‌باشد [۱۴].

ظرفیت واحد و بازدهی متان داشته باشد. تحقیقات نشان داده‌اند که نرخ تجزیه بی‌هوازی مواد آلی با افزایش دما، افزایش می‌یابد [۱۵]. یکی دیگر از مزایای فرایند گرمادوست نسبت به میانه‌دوست آن است که دمای زیاد باعث ضدعفونی شدن ریزاندام‌های بیماری‌زا



## ۴-۴ هضم بی‌هوازی تک‌فازی و دوفازی

زمینه، این فرایند به‌طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار نگرفته است [۱۴].

در هضم بی‌هوازی تک‌فازی، هر دو واکنش متان‌سازی و آب‌کافت/اسیدسازی در یک مخزن انجام می‌شوند، حال آنکه در هضم بی‌هوازی دوفازی، فاز متان‌ساز از فاز آب‌کافت‌کننده/اسیدساز جدا می‌گردد، به‌طوری‌که شرایط آب‌کافت در فاز اول و شرایط متان‌سازی در فاز دوم بهینه‌سازی شوند. به لحاظ نظری، انجام عملیات دوفازی مزایای زیادی برای فرآوری پسماندهای جامد در اختیار می‌گذارد؛ در واقع از آنجا که دو فعالیت آب‌کافت و متان‌سازی توسط باکتری‌های مختلف و در واکنشگاه‌های مختلفی صورت می‌گیرند، انتظار می‌رود که عملیات تجزیه مواد با سرعت و کارکرد بهتری انجام شود؛ اما علی‌رغم تحقیقات صورت گرفته در این

## ۴-۵ فرایندهای صنعتی برای هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی جامد

با توجه به تقاضای زیاد برای هاضم‌های بی‌هوازی مورد استفاده برای پسماندهای آلی جامد، در دهه‌های اخیر شرکت‌های مختلفی، طرح‌های انحصاری متعددی ارائه نموده‌اند. توضیحات و شکل برخی از رایج‌ترین این فرایندها به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۴) آورده شده است.

جدول ۲. فرایندهای صنعتی رایج برای هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی جامد [۵].

نام فرایند	توضیحات
بایوسل <sup>۱</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>هضم بی‌هوازی خشک با سیستم ناپیوسته</li> <li>محتوای کل جامدات در پسماند آلی جامد: ۴۰-۳۰٪ وزنی بر مبنای خشک</li> <li>برقراری دمای میانه‌دوست (۳۵-۴۰ °C) با پیش‌گرمایش شیرابه و پاشش آن به درون سیستم</li> <li>واکنشگاه مجهز به صفحه سوراخ‌دار و مجرا در کف، برای جمع‌آوری شیرابه</li> <li>زمان اقامت متوسط: ۲۱-۱۵ روز</li> <li>مناسب برای پسماندهای سبزیجات، میوه و پسماند باغچه‌ها</li> <li>ظرفیت: ۳۵۰۰۰ تن در سال</li> <li>محصولات تولیدی به ازای هر تن پسماند: ۳۱۰ kg کود کمپوست مرغوب، ۴۵۵ kg آب، ۱۰۰ kg ماسه، ۹۰ kg زیست‌گاز با ترکیب متوسط ۵۸٪ متان و ۴۵ kg پسماند بی‌اثر</li> </ul>
درانکو <sup>۲</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>هضم بی‌هوازی خشک با سیستم تک‌مرحله‌ای و سپس یک مرحله تثبیت هوازی کوتاه (حدوداً دو هفته)</li> <li>انجام عملیات عموماً در دمای گرمادوست (۵۵-۵۰ °C) با تزریق بخار؛ دماهای میانه‌دوست نیز برای برخی از پسماندهای خاص قابل اعمال است.</li> <li>واکنشگاه عمودی با جریان لوله‌ای بدون نیاز به اختلاط داخلی</li> <li>مناسب برای پسماندهایی با محتوای کل جامدات برابر با ۵۰-۲۰٪</li> <li>زمان اقامت متوسط: ۳۰-۱۵ روز</li> <li>بازدهی تولید زیست‌گاز: حدود ۲۰۰-۱۰۰ m<sup>3</sup> به ازای هر تن پسماند ورودی</li> </ul>
والرگا <sup>۳</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>هضم بی‌هوازی خشک با سیستم تک‌مرحله‌ای</li> <li>مناسب برای شرایط دمایی گرمادوست و میانه‌دوست</li> <li>واکنشگاه استوانه‌ای قائم و ایجاد اختلاط قائم با تزریق زیست‌گاز پر فشار در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای</li> <li>فرایندهای مورد نیاز پیش از خوراک‌دهی: جداسازی پرتابی خشک<sup>۴</sup> برای جدا کردن بخش سنگین و سایر آلاینده‌ها، خرد کردن پسماند زیستی برای دستیابی به اندازه &lt; ۸۰ mm، تنظیم محتوای جامدات کل برابر با ۳۲-۲۵٪ از طریق اختلاط با آب، پیش‌گرمایش با تزریق بخار</li> <li>زمان اقامت متوسط: ۲۵-۱۸ روز در شرایط میانه‌دوست</li> <li>بازدهی تولید زیست‌گاز: ۱۶۰-۸۰ m<sup>3</sup> به ازای هر تن خوراک</li> </ul>
کمپوگاز <sup>۵</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>هضم بی‌هوازی خشک با سیستم تک‌مرحله‌ای</li> <li>دمای عملیاتی گرمادوست (۶۰-۵۵ °C)</li> <li>واکنشگاه افقی با جریان لوله‌ای مجهز به همزن‌هایی با دور آهسته</li> <li>فرایندهای مورد نیاز پیش از خوراک‌دهی: پیش‌فرآوری مکانیکی پسماند جامد برای حذف ناخالصی‌ها و کاهش اندازه خوراک، تنظیم محتوای جامدات کل برابر با ۲۸-۲۳٪ از طریق اختلاط با آب</li> <li>زمان اقامت متوسط: ۲۰-۱۵ روز</li> <li>ظرفیت: ۲۵۰۰۰-۱۵۰۰۰ تن در سال</li> </ul>

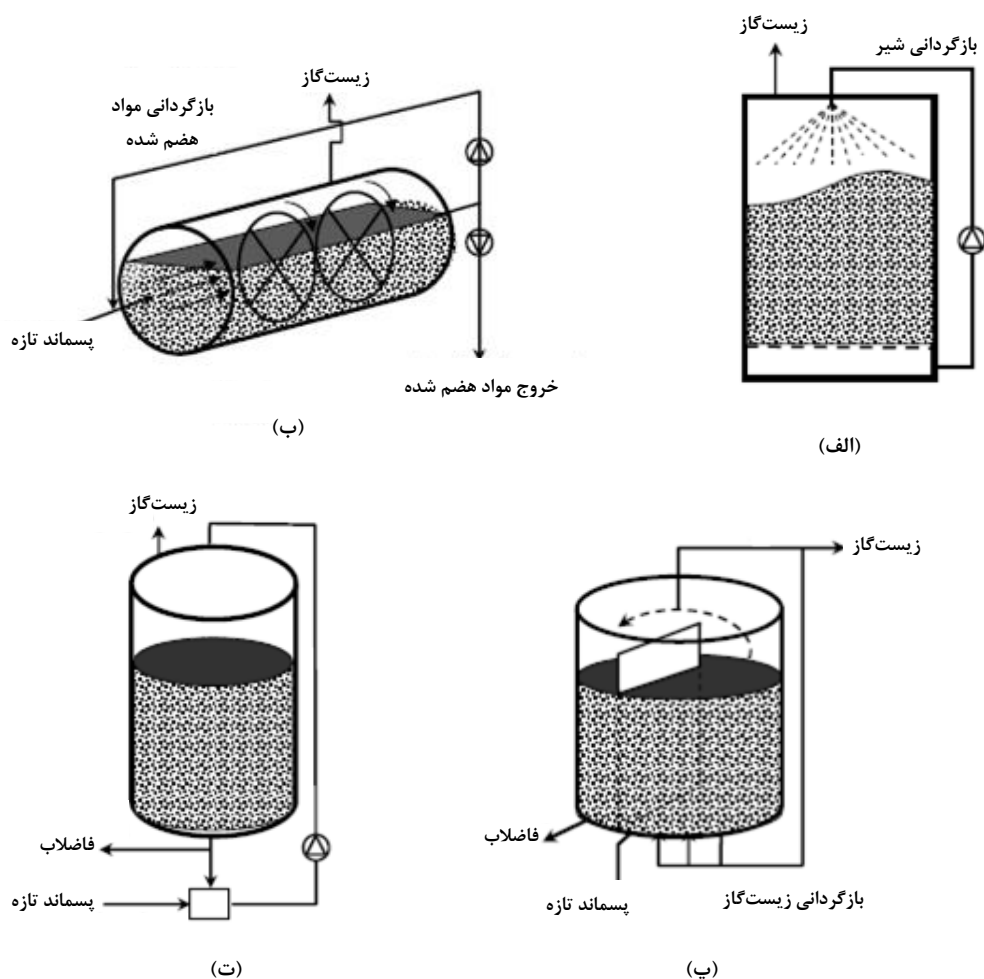
1. Biocel

2. Dranco

3. Valgora

4. Dry Ballistic Separation

5. Kompogas



شکل ۴. شکل‌واره‌ای از طراحی‌های متفاوت هاضم‌های بی‌هوازی (الف) بایوسل، (ب) کمپوگاز، (پ) والرگا و (ت) درانکو[۵].

کاهش خواهد یافت [۲]. در سال‌های اخیر، جهت راهبری هاضم بی‌هوازی در فصول سرد (به‌ویژه در کشورهای کانادا و آمریکا) و کاهش هزینه‌های انرژی و گرمایش، از هاضم‌های سایکروفلیک به‌صورت واکنشگاه‌های ناپیوسته متوالی<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند. این هاضم‌های ناپیوسته متوالی، عملکرد فرایند بی‌هوازی را در دمای پایین‌تر از ۳۵ درجه سلسیوس بهبود می‌بخشند [۱۷]. راجاگوپال و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای بر روی فرایند هضم بی‌هوازی ناپیوسته متوالی مخلوطی از پسماندهای خانگی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس (شرایط سرمادوست) انجام دادند که در این شرایط ۰/۴۷ متر مکعب گاز متان به‌ازای یک کیلوگرم مواد فرار تولید شد [۱۸] و این بازده تولیدی به نتایج هاضم‌های بی‌هوازی در شرایط گرمادوست و میانه‌دوست نزدیک است [۱۹ و ۲۰].

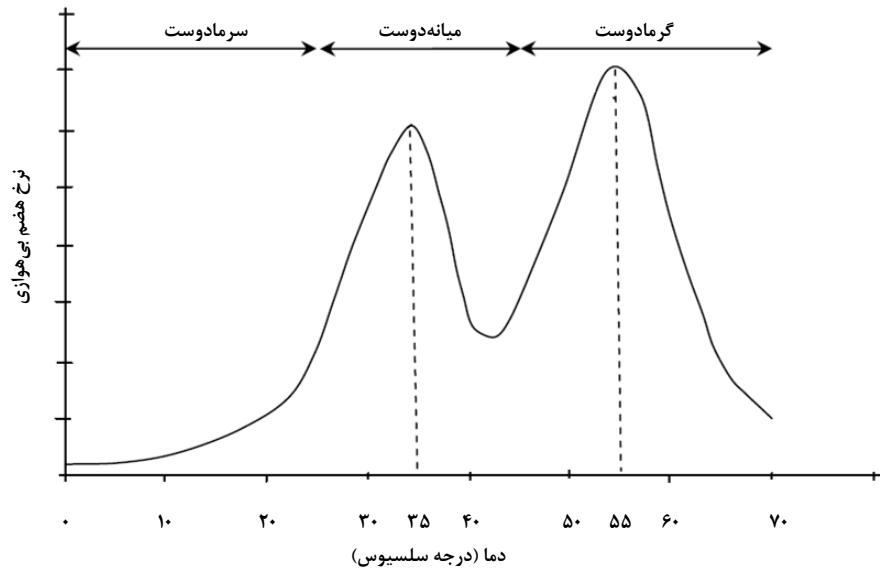
## ۵. عوامل مؤثر بر هضم بی‌هوازی پسماند آلی جامد

### ۵-۱- دما

دما تعیین‌کننده نرخ تجزیه بی‌هوازی، به‌ویژه سرعت واکنش‌های آب‌کافت و متان‌سازی، می‌باشد. معمولاً فرایند هضم بی‌هوازی در دو محدوده دمایی بهینه رخ می‌دهد: دمای میانه‌دوست با بهینه‌دمای حدوداً ۳۵ °C و دمای گرمادوست با بهینه‌دمای حدوداً ۵۵ °C (شکل ۵) [۵]. معمولاً دماهای پایین باعث کاهش رشد میکروبی، کاهش نرخ مصرف خوراک و نهایتاً کاهش تولید زیست‌گاز خواهند شد. همچنین، دماهای پایین می‌توانند باعث کاهش انرژی سلولی، نشت مواد مغذی درون سلولی و یا فساد کامل سلول گردند. از طرفی، در دماهای بالا با تولید گازهای فراری نظیر آمونیاک، که باعث کاهش فعالیت متان‌سازی می‌گردد، بازده تولید زیست‌گاز

2. Psychrophilic Anaerobic Digestion in Sequencing Batch Reactor (PADSBR)

1. Lysis



شکل ۵. اثر دما بر نرخ فرایند هضم بی‌هوازی. مشاهده می‌شود که دمای بهینه در شرایط میانه‌دوست حدوداً  $30-40^{\circ}\text{C}$  و در شرایط گرمادوست حدوداً  $50-60^{\circ}\text{C}$  می‌باشد [۵].

تغییرات pH هاضم می‌تواند بر جنبه‌های بسیاری از سوخت‌وسازی‌های پیچیده میکروبی اثر بگذارد. اگرچه فعالیت زیمایه‌ای قابل‌قبول باکتری‌های اسیدساز می‌تواند در  $\text{pH} = 5/0$  رخ دهد، اما اغلب باکتری‌های بی‌هوازی شامل باکتری‌های متان‌ساز در محدوده pH برابر با  $7/5 - 6/5$  عمل‌کنند و چنانچه مقدار pH کمتر از  $6/3$  یا بیشتر از  $7/8$  باشد، نرخ تولید متان کاهش خواهد یافت [۵].

تنظیم میزان قلیائیت و pH در هضم بی‌هوازی با استفاده از مواد شیمیایی متعددی از جمله سدیم بی‌کربنات، پتاسیم بی‌کربنات، کلسیم کربنات<sup>۱</sup>، کلسیم هیدروکسید<sup>۲</sup> و سدیم‌نیترات صورت می‌گیرد. افزودن هر یک از این مواد شیمیایی جهت تنظیم pH بایستی به آهستگی انجام شود تا اثرات نامطلوبی بر باکتری‌ها نگذارد [۵].

### ۳-۵ رطوبت

معمولاً مقادیر زیاد رطوبت باعث تسهیل هضم بی‌هوازی خواهد شد؛ البته ثابت نگه‌داشتن محتوای آب در یک چرخه هضم دشوار است. محتوای زیاد آب باعث حل شدن مواد آلی تجزیه‌پذیر می‌گردد و بدین‌گونه بر عملکرد فرایند اثر خواهد گذاشت [۲].

1. Lime  
2. Quick Lime

معمولاً باکتری‌های میانه‌دوست قادر به تحمل تغییرات بیشتری در عوامل محیطی، از جمله دما، می‌باشند. فرایندهایی که در محدوده دمایی گرمادوست صورت می‌گیرند، باعث افزایش سرعت واکنش، تولید بیشتر متان، حذف گونه‌های بیماری‌زا و کاهش گران‌روری جریان خروجی خواهند شد؛ اما این روش دارای حساسیت بیشتری در برابر مواد سمی و تغییر در شرایط عملیاتی می‌باشد. از دیدگاه مصرف انرژی، فرایندهای گرمادوست مطلوب نیستند؛ زیرا برای گرمایش چنین سیستم‌هایی به انرژی زیادی نیاز است [۵].

متداول‌ترین روش برای نگهداری هاضم بی‌هوازی در یک دمای مناسب، استفاده از مبدل‌های حرارتی خارجی است. مزیت این روش آن است که قبل از حرارت‌دهی، امکان اختلاط مواد هضم‌شده برگشتی با دوغاب ورودی، و تلقیح ریزجاندارهای بی‌هوازی در دوغاب ورودی را فراهم می‌سازد [۵].

### pH ۲-۵

مقدار pH یک هاضم بی‌هوازی نشان‌دهنده عملکرد و پایداری فرایند هضم می‌باشد. pH یک دوغاب در مراحل مختلف هضم تغییر می‌کند؛ در اولین مرحله تولید اسید در فرایند تخمیر، مقدار pH در حدود ۶ یا کمتر است و طی ۲-۳ هفته بعدی، با هضم اسیدهای فرار مقدار pH افزایش یافته،  $\text{CH}_4$  تولید خواهد شد [۷].

#### ۴-۵ مواد مغذی

اصلی‌ترین مواد مغذی مورد نیاز برای باکتری‌های موجود در هاضم عبارتند از: کربن (C)، هیدروژن (H<sub>2</sub>)، اکسیژن (O<sub>2</sub>)، نیتروژن (N<sub>2</sub>)، فسفر (P) و گوگرد (S). از بین تمام این مواد مغذی، N<sub>2</sub> و P معمولاً همواره به مقادیر کمی وجود دارند و به همین دلیل برای برقراری تعادل مناسبی از مواد مغذی، باید مواد خام غنی از نیتروژن و فسفر را به صورت مازاد به پسماندهای جامد افزود تا بتوان میزان تولید زیست‌گاز را به حداکثر رساند [۷].

#### ۵-۵ نسبت کربن / نیتروژن

ترکیب پسماند تعیین‌کننده مقادیر نسبی کربن و نیتروژن آلی موجود در خوراک است (نسبت C/N). پسماند جامدی با نسبت C/N

زیاد، به دلیل دارا بودن مقدار بسیار کم نیتروژن، برای رشد باکتری مناسب نیست و در نتیجه نرخ تولید گاز و تجزیه جامدات بسیار کم خواهد بود. از طرف دیگر، چنانچه نسبت C/N بسیار کم باشد، فرایند تجزیه منجر به تولید و تجمع آمونیاک می‌گردد که برای باکتری‌ها سمی است. طبق مطالعات انجام شده، نسبت بهینه C/N برای هاضم بی‌هوازی در محدوده ۲۵-۳۰ قرار دارد (براساس کربن آلی زیست‌تخریب‌پذیر و نیتروژن آلی). جهت دستیابی به مقدار مذکور، خوراکی‌هایی با نسبت C/N بالا را می‌توان با پسماندهای آلی سرشار از مواد مغذی (نسبت C/N کم)، از جمله فضولات حیوانات و یا پسماندهای غذایی، مورد هضم ترکیبی قرار داد (جدول (۳)) [۲۵].

جدول ۳. مواد ترکیبی قابل هضم در هاضم بی‌هوازی با نسبت‌های مختلف کربن / نیتروژن [۲۱].

مواد دارای نسبت بالای کربن / نیتروژن		مواد دارای نسبت پایین کربن / نیتروژن	
نسبت کربن / نیتروژن	نام ترکیب	نسبت کربن / نیتروژن	نام ترکیب
۵۱-۶۷	کاه برنج	۱۶-۲۵	فضولات گاو
۵۰-۱۵۰	کاه گندم	۵-۱۵	فضولات مرغ
۵۰-۵۶	کاه ذرت	۲۰-۲۵	فضولات اسب
۴۸-۵۰	کاه جو	۳۰-۳۳	فضولات گوسفند
۷۰-۷۹	جلبک دریایی	۱۰-۱۷	فضولات بز
۷۵-۱۰۰	جلبک	۷-۳۵	پسماند تره‌بار
۲۰۰-۵۰۰	خاک اره	۳-۱۷	پسماند مواد غذایی
۱۴۰-۱۵۰	باگاس نیشکر	۱۶-۴۰	پسماند غلات
۵۰-۵۳	برگ‌های ریخته شده	۲۲-۳۷	پسماند کشتارگاه
۲۰۰-۵۰۰	خاک اره	۱۲-۱۷	یونجه
۳۵-۶۰	سیب‌زمینی	۱۲-۱۶	پسماند تولیدی چمن‌زنی

## ۵-۶ زمان اقامت هیدرولیکی<sup>۱</sup>

با نرخی برابر با نرخ تولید آن‌ها، مصرف کنند؛ بنابراین تجمع اسیدهای چرب باعث کاهش pH و ممانعت از فعالیت باکتری‌های متان‌ساز شده، در نهایت منجر به توقف سیستم می‌گردد [۵].

## ۵-۸ غلظت جامد کل مواد ورودی<sup>۵</sup>

مقدار غلظت جامد خوراک اولیه بر بازده و عملکرد فرایند هضم بی‌هوازی پسماند تأثیر می‌گذارد و با افزایش درصد جامد کل در خوراک ورودی در هر دو شرایط گرمادوست و میانه‌دوست، درصد حذف مواد آلی و بازده متان تولیدی کاهش می‌یابد [۲۳]. بنابر گزارش‌ها با افزایش غلظت جامد از ۲۰ به ۳۰ درصد، حذف COD از ۸۰ به ۶۹ درصد و بازده متان تولیدی هم، ۱۷ درصد کاهش می‌یابد [۲۳].

## ۵-۹ شرایط اختلاط

اختلاط باعث افزایش تماس بین خوراک تازه ورودی و جمعیت میکروبی و نیز مانع از توزیع نامناسب دما و تجمع لایه سطحی<sup>۶</sup> در هاضم بی‌هوازی می‌شود. همچنین، با انجام اختلاط مناسب می‌توان اطمینان حاصل نمود که جامدات در فاز آویزش (سوسپانسیون) باقی می‌مانند و فضای مرده‌ای در واکنشگاه ایجاد نخواهد شد. تحقیقات نشان داده‌است که اختلاط آهسته منجر به عملکرد عالی در هضم ذرات جامد پسماندهای شهری می‌شود و نرخ تولید گاز را افزایش می‌دهد. اما اختلاط پیوسته و شدید می‌تواند در مقادیر بارگذاری آلی زیاد به‌عنوان یک عامل بازدارنده عمل کند؛ زیرا باعث اختلال در روابط متقابل و جایگیری فضایی مواد و ریزجاندارها در کنار یکدیگر خواهد شد [۲۴]. عمل اختلاط در هاضم‌های بی‌هوازی با استفاده از روش‌های متعددی از جمله استفاده از همزن‌های مکانیکی، بازگردانی دوغاب (لجن هاضم) و یا تزریق زیست‌گاز تولید شده، امکان‌پذیر است [۵].

## ۵-۱۰ مواد بازدارنده

مواد بازدارنده عمل هضم بی‌هوازی می‌توانند به‌صورت ترکیباتی در خوراک ورودی موجود و یا محصول جانبی فعالیت‌های سوخت‌وسازی مجموعه باکتری‌های موجود در هاضم باشند. برخی از مهم‌ترین این مواد عبارت است از:

زمان ماند هیدرولیکی نشان‌دهنده زمان متوسط اقامت یک ماده خاص در هاضم می‌باشد. در یک هاضم پیوسته، محتویات واکنشگاه دارای زمان ماند نسبتاً یکنواختی است. در چنین سیستمی، حداقل زمان ماند توسط نرخ رشد ریزاندام‌های ضروری دارای آهسته‌ترین میزان رشد تعیین می‌گردد (جدول (۴)). چنانچه مقدار زمان ماند کمتر از این میزان حداقل باشد، ریزاندام‌هایی با نرخ رشد آهسته (متان‌سازها) از سیستم خارج شده<sup>۲</sup> و در نتیجه عملکرد سیستم دچار اختلال خواهد شد. از طرفی، کاهش زمان ماند باعث کاهش اندازه هاضم می‌شود و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر خواهد بود. همچنین زمان ماند کوتاه‌تر، سبب افزایش بازدهی تولید زیست‌گاز می‌گردد، اما تجزیه مواد آلی (مانند جامدات فرار) با کارایی کمتری صورت گرفته، می‌تواند منجر به ناپایداری فرایند شود. طبق مطالعات انجام گرفته باتوجه به نوع خوراک، تعداد مراحل فرایند، دمای عملیاتی و شکل واکنشگاه، زمان ماند هیدرولیکی می‌تواند در محدوده ۵ تا ۵۵ روز متغیر باشد [۵].

جدول ۴. مدت زمان رشد و تولید مثل [۲۲].

مدت زمان رشد و تولید مثل	نوع ریزاندام بی‌هوازی
۲۴-۳۶ ساعت	باکتری‌های اسیدساز
۸-۹۰ ساعت	باکتری‌های استات‌ساز
۵-۱۶ روز	باکتری‌های متان‌ساز

## ۵-۷ مقدار بارگذاری مواد آلی<sup>۳</sup>

مقدار بارگذاری مواد آلی عبارت است از مقدار مواد آلی (به صورت جامدات فرار و یا اکسیژن شیمیایی موردنیاز<sup>۴</sup> خوراک) که بایستی توسط حجم معینی از هاضم بی‌هوازی و در مدت زمان معینی مورد فرآوری قرارگیرد. یکی از خطرات احتمالی افزایش مقدار بارگذاری آلی این است که باکتری‌های آب‌کافت‌کننده و اسیدساز به‌سرعت محصولات میانی تولید می‌کنند. از آنجا که زمان تکثیر باکتری‌های متان‌ساز کوتاه‌تر است، این باکتری‌ها نمی‌توانند اسیدهای چرب را

1. Hydraulic Retention Time (HRT)
2. Washout
3. Organic Loading Rate (OLR)
4. Chemical Oxygen Demand (COD)

5. Total Solid (TS)  
6. Scum

### ۵-۱۰-۱ آمونیاک

آمونیاک یکی از محصولات آب‌کافت است که در حین هضم بی‌هوازی، از طریق تجزیه مواد نیتروژنی موجود در پروتئین‌ها، فسفولیپیدها، لیپیدهای نیتروژنی و نوکلئیک‌اسیدها ایجاد می‌گردد. در یک محلول، آمونیوم می‌تواند به شکل یون آمونیوم یا آمونیاک آزاد دارای اثر بازدارندگی شدیدتری است؛ زیرا می‌تواند به راحتی از غشاء عبور و به درون سلول‌ها نفوذ نماید و بدین ترتیب باعث برهم خوردن تعادل پروتونی و/یا کمبود پتاسیم گردد [۵].

### ۵-۱۰-۲ سولفید

تشکیل هیدروژن سولفید در هضم بی‌هوازی، ناشی از فرایند کاهش ترکیبات سولفوری اکسید شده و لخته شدن آمینواسیدهای حاوی سولفور توسط باکتری‌های کاهنده سولفات<sup>۱</sup> است. بازدارندگی ناشی از فرایند کاهش سولفات را می‌توان به دو مرحله تفکیک کرد؛ بازدارنده اولیه از طریق کاهش تولید متان در اثر رقابت باکتری‌های کاهنده سولفات با باکتری‌های متان‌ساز، برای تأمین مواد مغذی آلی و غیرآلی تعیین می‌شود. بازدارنده ثانویه در اثر سمیت سولفید برای بسیاری از گروه‌های باکتری‌های بی‌هوازی ایجاد می‌شود [۵].

### ۵-۱۰-۳ مواد آلی

تجمع مواد آلاینده آلی آب‌گریز در غشاهای باکتریایی باعث ایجاد تورم و نشستی غشا، اختلال در گرادیان غلظت‌های یونی و نهایتاً شکسته شدن غشاهای سلولی خواهد شد. برخی از مواد آلی مهم که دارای اثر بازدارندگی برای فرایند هضم بی‌هوازی می‌باشند، عبارتند از: کلروفنول‌ها، آلیفاتیک‌های هالوژن‌دار، آروماتیک‌های دارای جایگزین نیتروژنی، اسیدهای چرب دراز زنجیر و لیگنین و مشتقات آن.

برخی از راهکارها جهت به حداقل رساندن اثرات بازدارندگی مواد عبارت است از [۵]:

۱. حذف موادی با قابلیت بازدارندگی/سمی بودن از خوراک ورودی
۲. رقیق‌سازی خوراک جهت کاهش غلظت مواد بازدارنده و رساندن آن به کمتر از حد مجاز

۳. افزودن مواد شیمیایی جهت رسوب‌دهی و یا نامحلول شدن مواد بازدارنده

۴. تغییر شکل شیمیایی مواد بازدارنده از طریق کنترل pH

۵. افزودن موادی که قادر به مبارزه با مواد بازدارنده باشند تا بتوان با اثر بازدارندگی آن‌ها مقابله کرد.

### ۵-۱۰-۴ فلزات سنگین و کاتیون‌ها

همان‌طور که باکتری‌های بی‌هوازی جهت فعالیت آنزیمی به فلزات سنگین و برخی کاتیون‌ها در غلظت کم نیاز دارند، غلظت بالاتر از حد مجاز این فلزات، اثر بازدارندگی بر روی فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی دارد. در جدول (۵)، غلظت مورد نیاز و بازدارنده فلزات سنگین و کاتیون‌ها جهت فعالیت ریزاندام‌های بی‌هوازی آورده شده است. فلزات سنگین زیست‌تخریب‌ناپذیر هستند و با تجمع یافتن در محیط بی‌هوازی ساختار و عملکرد زیمايه‌ها را تخریب و فعالیت ریزاندام‌های بی‌هوازی را متوقف می‌کنند [۲۵].

### جدول ۵. غلظت مورد نیاز و بازدارندگی برخی از

#### فلزات در فرایند بی‌هوازی [۲۵].

نام عنصر	نیاز جهت فعالیت باکتری (میلی گرم بر لیتر)	حداقل غلظت شروع بازدارندگی (میلی گرم بر لیتر)	
		یون آزاد	ترکیب بی‌کربناتی
کروم	۰/۰۰۵-۵۰	۲۸-۳۰۰	۵۳۰
آهن	۱-۱۰	-	۱۷۵۰
نیکل	۰/۰۰۵-۰/۵	۱۰-۳۰۰	-
مس	موردنیاز ریزاندام‌های اسیدساز	۵-۳۰۰	۱۷۰
روی	موردنیاز ریزاندام‌های اسیدساز	۳-۴۰۰	۱۶۰
کادمیوم	-	۷۰-۶۰۰	۱۸۰
سرب	۰/۰۲-۲۰۰	۸-۳۴۰	-
سدیم	-	۵۰۰۰-۳۰۰۰۰	-
پتاسیم	-	۲۵۰۰-۵۰۰۰	-
کلسیم	-	۲۵۰۰-۷۰۰۰	-
منیزیم	موردنیاز ریزاندام‌های اسیدساز	۱۰۰۰-۲۴۰۰	-

1. Sulfate Reducing Bacteria (SRB)

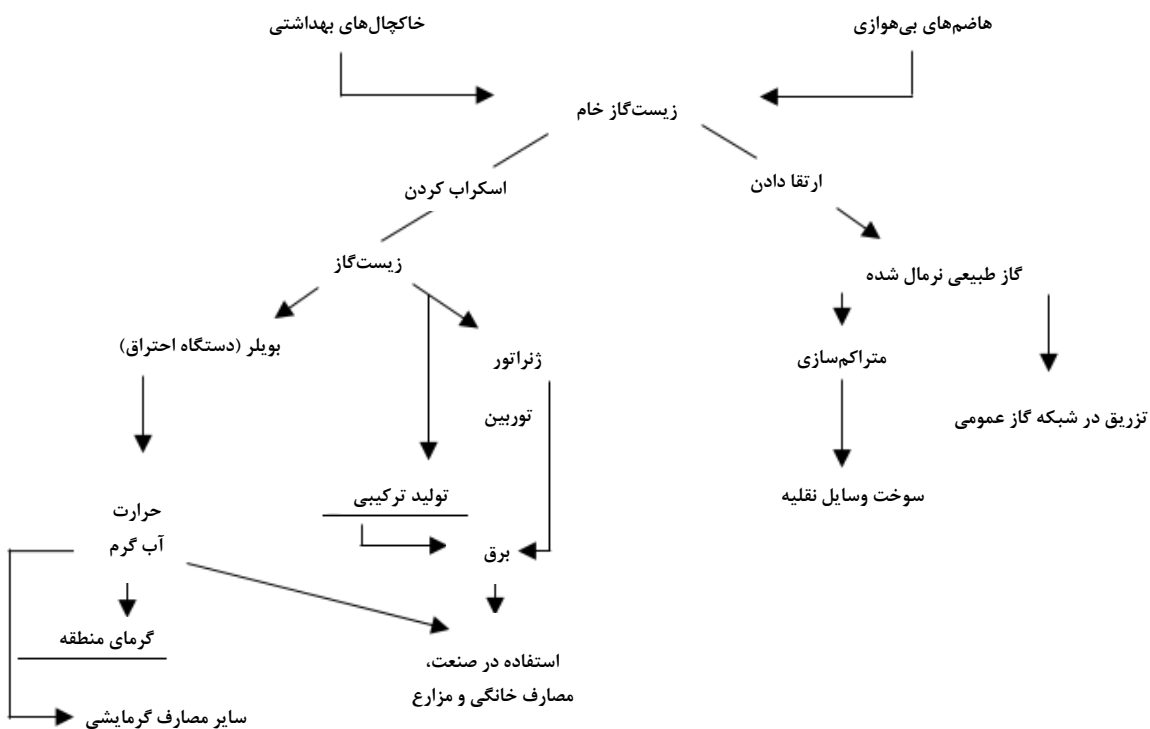
تأمین انرژی متمایز می‌سازد [۲]. گاز ساطع شده از خاکچال‌ها نیز ترکیبی مشابه زیست‌گاز تولید شده در فرایند هضم بی‌هوازی دارد، اما این گاز می‌تواند حاوی ترکیبات سمی باشد که در اثر تجزیه مواد پسماند در محل تولید می‌شود. بازیابی گاز خاکچال نه تنها از نظر محافظت از محیط‌زیست و کاهش انتشارات متان و سایر گازها اهمیت دارد، بلکه می‌تواند به‌عنوان منبع ارزان‌قیمت انرژی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به دوردست بودن مناطق خاکچال، معمولاً گاز به‌دست آمده از خاکچال برای تولید برق استفاده می‌شود، اما کاربردهای دیگری نظیر گرمایش، تبدیل به سوخت و سایر نقلیه و دیگر کاربردها نیز امکان‌پذیر می‌باشد. به‌طور کلی، زیست‌گاز را می‌توان از طریق سوزاندن مستقیم جهت تولید گرما، تولید الکتریسیته توسط پیل‌های سوختی یا ریزتوربین‌ها، تولید همزمان برق و حرارت<sup>۱</sup>، تزریق در لوله‌کشی‌های گاز به‌صورت مستقیم و یا به‌همراه گاز طبیعی و یا به‌عنوان سوخت و سایر نقلیه استفاده کرد (شکل (۶)) [۴].

برخی از فلزات سنگین (سرب، روی، مس و کادمیم) را می‌توان با افزودن ترکیبات پلی‌فسفاتی در محیط بی‌هوازی حذف کرد [۸]. گزارش شده است که می‌توان با افزودن سولفید با غلظت ۱-۲ میلی‌گرم بر لیتر فلزات سنگین را در محیط آبی ته‌نشین کرد که البته باید غلظت بازدارندگی سولفید (۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) را رعایت کرد [۸].

### ۶. زیست‌گاز تولید شده در فرایند هضم بی‌هوازی

زیست‌گاز متشکل از ۶۵-۶۰٪ متان، ۳۵-۴۰٪ کربن‌دی‌اکسید، ۱/۰-۰/۵٪ هیدروژن سولفید و بخار آب و تقریباً ۲۰٪ از هوا سبک‌تر است [۷]. ارزش سوختی گاز به‌دست آمده از هاضم تقریباً برابر با  $656 \text{ BTU/ft}^3$  است، اما این مقدار می‌تواند با توجه به ترکیبات موجود در گاز تغییر نماید [۲۶]. برخلاف سوخت‌های فسیلی، زیست‌گاز در ایجاد اثر گلخانه‌ای، تخریب لایه اُزن و ایجاد باران اسیدی دخالت چندانی ندارد. این مسأله یکی از دلایل اصلی است که فرایند هضم بی‌هوازی را به‌عنوان یکی از فرایندهای مهم در

### کاربردهای زیست‌گاز



شکل ۶. شکل‌واره کلی کاربردهای زیست‌گاز [۴].

زیست‌شناسانه می‌توان زیست‌گاز را به متانول، اتانول و یا الکل‌هایی با کربن بیشتر تبدیل نمود. اکسیدکردن جزئی متان (معادله (۱))، یک روش صنعتی توسعه‌یافته برای تبدیل متان موجود در گاز طبیعی به متانول می‌باشد که می‌تواند روشی عملی در مورد زیست‌گاز نیز تلقی شود. تبدیل زیست‌شناسانه متان به متانول نیز توسط باکتری‌های متان‌ساز<sup>۷</sup> قابل انجام است [۱۷].



با اعمال موازنه جرم کلی برای زیست‌واکنشگاه می‌توان مقدار متان تولید شده توسط سیستم را محاسبه نمود. موازنه جرم براساس COD صورت می‌گیرد: ۱۰٪ از اختلاف COD در جریان مایع ورودی و خروجی به‌عنوان زیست‌توده درون زیست‌واکنشگاه تجمع می‌یابد و ۹۰٪ آن به متان تبدیل می‌گردد. طبق تجربه‌های عملیاتی، به‌منظور تخمین متان تولیدی می‌توان از نسبت  $\text{CH}_4 \text{ m}^3 / 0.35$  به‌ازای هر کیلوگرم COD تجزیه‌شده، به‌عنوان یک نسبت واقع‌گرایانه استفاده کرد. همچنین، درصد متان موجود در زیست‌گاز توسط معادله (۲) برآورد می‌شود [۷]:

$$\% \text{CH}_4 = \left\{ 0.5 - \frac{[4 - 1.5 \frac{\text{COD}}{\text{TOC}}]}{8} \right\} \times 100 \quad (2)$$

در معادله (۲) COD و TOC به‌ترتیب نشان‌دهنده غلظت‌های اکسیژن شیمیایی موردنیاز و کل کربن آلی<sup>۸</sup> می‌باشد. با دانستن ترکیب آلی مواد و فرض تبدیل کامل به زیست‌گاز، بازدهی نظری تولید متان قابل محاسبه خواهد بود؛ اما در عمل، بازده زیست‌گاز به‌دست آمده در هاضم همواره کمتر از مقادیر نظری می‌باشد؛ زیرا: (۱) بخشی از خوراک برای تولید زیست‌توده استفاده می‌شود (معمولاً ۱۰-۵٪ از مواد آلی تجزیه‌شده)؛ (۲) بخشی از خوراک در جریان خروجی به‌صورت تبدیل‌نشده ظاهر می‌شود (معمولاً ۱۰٪)؛ و (۳) محدودیت مواد مغذی [۷].

در سال‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری برای تبدیل زیست‌گاز به سوخت‌های مورداستفاده در حمل‌ونقل ازجمله سوخت CNG زیستی<sup>۱</sup>، زیست‌گاز مایع<sup>۲</sup>، متانول و اتانول صورت گرفته‌است [۲۷]. با حذف دی‌اکسیدکربن و متراکم ساختن ب زیست‌گاز در سیلندر، این گاز به‌آسانی در کاربردهای حمل‌ونقلی و نیز در کاربردهای ساکن در مسافت‌های طولانی قابل استفاده می‌گردد. همچنین، از آنجا که متان زیستی (زیست‌گاز غنی‌شده) تقریباً مشابه CNG است، می‌تواند با خالص‌سازی کافی، از این گاز در کاربردهایی مشابه CNG استفاده نمود [۷].

برای غنی‌سازی زیست‌گاز بایستی گازهای نامطلوب ( $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  و بخار آب) را از آن حذف کرد تا در انرژی لازم برای متراکم‌سازی و فضای اشغال‌شده در سیلندر صرفه‌جویی شود و از اثر خوردگی زیست‌گاز کاسته شود. فرایندهای متعددی برای غنی‌سازی زیست‌گاز وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارت است از: شستشو (اسکراپ کردن) با آب تحت فشار<sup>۳</sup>، جذب در فشار متغیر<sup>۴</sup>، جذب توسط ترکیبات آمینی یا سایر ترکیبات آلی، روش‌های غشایی و روش سردسازی<sup>۵</sup> [۲۷]. استفاده از آب تحت فشار به‌عنوان مایع جاذب، یکی از ساده‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌ها می‌باشد. در این روش، زیست‌گاز متراکم شده و آب با جریان ناهمسو وارد یک ستون شستشو<sup>۶</sup> می‌شود تا بدین‌طریق کربن‌دی‌اکسید و هیدروژن سولفید موجود در ب زیست‌گاز در قطرات آب جذب شود و متان خالص در مخزنی بالای ستون جمع‌آوری گردد. در این روش با توجه به فشار زیست‌گاز و آب در ستون شستشو، غنی‌سازی متان تا بیش از ۹۵٪ قابل دستیابی می‌باشد. در نهایت گاز متراکم‌شده در استوانه‌های تحت فشار از جنس استیل ذخیره خواهد شد [۷].

CNG زیستی را می‌توان با متراکم ساختن (۲۰-۲۵ Mpa) زیست‌گاز خالص ( $\text{CH}_4$  ۹۷٪ و  $\text{O}_2$  ۲٪) تا کمتر از ۱٪ حجمی که در شرایط فشار اتمسفری استاندارد اشغال می‌کند، تولید نمود. به‌منظور تولید زیست‌گاز مایع، زیست‌گاز خالص تحت فرایند مایع‌سازی قرار می‌گیرد تا متان زیستی به یک مایع سرد در دمایی بین  $161^\circ\text{C}$  - تا  $196^\circ\text{C}$  تبدیل شود. همچنین، با استفاده از روش‌های شیمیایی یا

1. Bio-CNG
2. Liquefied Biogas (LBG)
3. Pressurized Water Scrubbing
4. Pressure Swing Adsorption
5. Cryogenic Method
6. Scrubber Column

7. Methanotrophic Bacteria  
8. Total Organic Carbon



## ۷. مواد هضم شده به دست آمده از فرایند هضم

### بی‌هوازی

برخی از مهم‌ترین تغییراتی که در هضم بی‌هوازی بر مواد هضم‌شده ایجاد می‌شود، عبارت است از:

#### ۱-۷ کاهش بو

طی هضم بی‌هوازی، بوی نامطبوع حاصل از مواد بدبو (اسیدهای فرار، فنول و مشتقات آن) تا حد چشمگیری کاهش می‌یابد. این مسأله تنها به معنای کاهش شدت و ماندگاری بو نیست، بلکه تغییرات مثبتی نیز در ترکیب این بوها حاصل خواهد شد؛ زیرا مواد هضم‌شده دیگر حاوی مواد دوغابی شکل با بوی بد نیست و بویی شبیه به آمونیاک دارد. حتی در صورت نگهداری طولانی‌مدت، بوی نامطبوعی از مواد هضم‌شده متصاعد نخواهد شد [۴].

#### ۲-۷ بهداشتی‌سازی<sup>۱</sup>

فرایند هضم بی‌هوازی قادر به غیرفعال‌سازی ویروس‌ها، باکتری‌ها و انگل‌های موجود در خوراک می‌باشد که تحت‌عنوان بهداشتی‌سازی شناخته می‌شود. کارکرد بهداشتی‌سازی هضم بی‌هوازی به زمان ماند واقعی خوراک در هاضم، دمای فرایند، نحوه اختلاط و نوع هاضم بستگی دارد. بهترین بهداشتی‌سازی در دماهای گرمادوست ( $50-55^{\circ}\text{C}$ ) و در یک واکنشگاه لوله‌ای طولانی با زمان اقامت کافی حاصل خواهد شد. در این نوع هاضم، بین مواد هضم‌شده و خوراک تازه هیچ اختلاطی صورت نمی‌گیرد و به همین دلیل حداکثر ۹۹٪ از عوامل بیماری‌زا حذف می‌گردند [۴].

#### ۳-۷ بهبود کودسازی

حین فرایند هضم بی‌هوازی، پیوندهای آلی موجود در اکثر مواد مغذی، به‌ویژه نیتروژن، شکسته شده، در نتیجه مواد معدنی به آسانی در دسترس گیاهان قرار خواهد گرفت. به همین دلیل در مقایسه با دوغاب هضم‌نشده، اعمال مواد هضم‌شده بر خاک باعث ایجاد تنش کمتر و فراهم آوردن محیط مناسب‌تری برای موجودات خاکی می‌گردد [۴]. مواد هضم‌شده در هضم بی‌هوازی معمولاً غنی از مواد مغذی نظیر نیتروژن و فسفر می‌باشند بنابراین در سال‌های

اخیر، تلاش‌های بسیاری برای استفاده از این ماده در کاربردهایی همچون اصلاح خاک و یا تولید کود صورت گرفته‌است. همچنین می‌توان مواد هضم‌شده را در کارخانه‌های کمپوست‌سازی مورد فرآوری قرار داد تا بتوان بدین وسیله موجب افزایش محتوای مواد جامد، کاهش بیشتر عوامل بیماری‌زا و تولید کمپوست صنعتی شد [۱۷]. از طرفی، معمولاً مواد هضم‌شده در هضم بی‌هوازی دارای محتوای رطوبت زیاد و مقدار قابل توجهی اسیدهای چرب فرار می‌باشند که برای گیاهان سمی است. همچنین اگر عمل هضم در شرایط دمایی گرمادوست انجام نشده باشد، این مواد از نظر بهداشتی مشکل‌ساز خواهند بود. بنابراین به منظور تثبیت بیشتر مواد هضم‌شده و دستیابی به محصولی با کیفیت بالا باید بعد از هضم بی‌هوازی از یک مرحله هضم هوازی استفاده نمود [۱]. لازم به ذکر است که باتوجه به محتوای مواد اولیه موجود در خوراک هاضم بی‌هوازی، مواد هضم‌شده و سایر محصولات جانبی این فرایند می‌توانند شامل پلاستیک، فلزات سنگین و سایر مواد غیرآلی باشند که در جدول (۶) حد مجاز آلاینده‌های موجود در مواد هضم‌شده جهت مصارف کشاورزی و رها شدن در محیط آورده شده‌است. فلزات سنگین، ریزپلاستیک‌ها و سایر آلاینده‌های آلی، محدودیتی در مصرف مستقیم مواد هضم‌شده به‌عنوان کود ایجاد می‌کنند؛ بنابراین در چنین شرایطی پیش از رهاکردن مواد هضم‌شده در محیط (به‌صورت کود و یا دفن بهداشتی در خاکچال)، باید فرآوری‌های دیگری نیز روی این مواد صورت گیرد. یکی دیگر از مسائل هضم بی‌هوازی که می‌تواند بر مواد هضم‌شده اثر نامطلوبی بگذارد، اضافه کردن موجودات اصلاح‌شده ژنتیکی به‌منظور افزایش بازدهی تولید و کارکرد هضم است. با رهاسازی مواد هضم‌شده در محیط (به صورت کود و یا دفن بهداشتی در خاکچال)، چنین موجوداتی می‌توانند با سایر ریزاندام‌های طبیعی خاک وارد رقابت شوند و با کاهش تنوع آن‌ها منجر به ایجاد اثرات مخربی گردند. بنابراین علی‌رغم کاربردهای مواد هضم‌شده، باید در رابطه با مسائل فوق، جوانب احتیاط را رعایت نمود [۷].

جدول ۶. حد مجاز آلاینده‌های موجود در موادهضم شده برای رها کردن در محیط [۲۵].

نام ماده	حداکثر مجاز غلظت (میلی گرم بر کیلوگرم ماده هضم شده)	نام ماده	حداکثر مجاز غلظت (میلی گرم بر کیلوگرم ماده هضم شده)
کادمیم	۸۵	بیفنیل پلی کلر شده	۰/۱-۱/۲
سرب	۱۰۰-۱۵۰	نسبت دیوکسین به فوران	۲۰-۱۰۰ (نانوگرم بر کیلوگرم ماده هضم شده)
نیکل	۴۲۰	پرفلوئورو آلکیلایت <sup>۲</sup>	۱۰۰ (میکروگرم بر کیلوگرم ماده هضم شده)
مس	۲۰۰	هیدروکربن‌های آروماتیکی چندحلقه‌ای <sup>۲</sup>	۳-۱۰
روی	۶۰۰	نونیل فنول‌ها	۳/۵
جیوه	۰/۲	ریزپلاستیک‌ها	۱۴-۱۴۶ (ذره بر کیلوگرم ماده هضم شده)

جدول ۷. اجزای زباله شهر تهران [۲۹].

درصد	نوع زباله
۶۷/۸	زباله فسادپذیر
۱/۰	نان
۲/۲	پلاستیک نرم
۰/۶	پلاستیک سخت
۰/۶	پت
۶/۲	شمع
۴/۴	کاغذ
۳/۷	مقوا
۱/۶	فلزات آهنی
۰/۲	فلزات غیر آهنی
۳/۴	پارچه
۲/۴	شیشه
۱/۷	چوب
۰/۶	چرم
۰/۷	لاستیک
۱/۳	گردوغبار
۱/۶	زباله بهداشتی

#### ۸. امکان‌پذیری هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد در ایران

طبق مطالعات اقتصادی انجام‌گرفته، در مقایسه با روش‌های زباله‌سوزی و گازسازی، تولید انرژی از پسماندهای جامد با استفاده از روش هضم بی‌هوازی مقرون‌به‌صرفه‌تر است و علاوه بر تولید محصولات ارزشمند، به هزینه سرمایه‌گذاری کمتری نیز احتیاج دارد. به‌طور کلی فرایند هضم بی‌هوازی در کشورهای پیشرفته، به‌ویژه کشورهای اروپایی، به‌سرعت در حال گسترش است و زیست‌گاز تولیدی در این فرایند به‌عنوان یک منبع انرژی پاک مورد استفاده قرار گرفته‌است.

در یکی از تحقیق‌های انجام شده برای بررسی امکان‌پذیری فرایند هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد ایران، اجزای زباله شهر تهران مورد مطالعه قرار گرفتند (جدول (۷)). طبق جدول (۷)، مواد غذایی فسادپذیر حدود ۷۰٪ از زباله شهر تهران را تشکیل می‌دهد. این آمار بدان معناست که حداقل ۷۰٪ از زباله تهران قابل استفاده در هاضم‌های بی‌هوازی است [۲۹]. بابایی و شایگان (۲۰۱۱) تحقیقاتی بر روی هضم بی‌هوازی پسماند تر (سبزیجات و میوه) تهران انجام دادند و توانستند ۰/۴ مترمکعب زیست‌گاز به ازای یک کیلوگرم مواد فرار ورودی تولید کنند [۳۰].

1. Polychlorinated Biphenyl (PCBs)
2. Perfluoralkyl (PFAs)
3. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs)

طبق این بررسی، با فرض آن که قابلیت تولید انرژی خالص در هضم بی‌هوازی ۱۰۰۰-۵۰۰ کیلووات ساعت به ازای هر تن پسماند باشد و با در نظر گرفتن قیمت متوسط هر کیلووات ساعت برق (۰/۱۰۸ دلار)، میزان الکتریسیته تولیدی برابر با ۵۴ دلار در هر تن پسماند خواهد بود. علاوه بر این، یکی دیگر از محصولات هضم بی‌هوازی کود است و می‌توان به ازای هر تن پسماند جامد شهری، ۰/۵۳۸ تن کمپوست به دست آورد [۲۹].

### ۹. نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، هضم بی‌هوازی به‌عنوان یکی از مؤثرترین فرایندهای زیست‌شناسانه به‌منظور تصفیه محدود و وسیعی از پسماندهای جامد آلی معرفی شد. علی‌رغم برخی از پیچیدگی‌های فرایند هضم بی‌هوازی و طولانی بودن مدت‌زمان انجام این فرایند، هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد مزایای بسیاری - از جمله انتشار کمتر آلاینده‌ها در حین هضم، تولید هم‌زمان زیست‌گاز به‌عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر و مواد هضم شده قابل استفاده به‌عنوان کمپوست و اصلاح‌کننده خاک، مدیریت پسماندهای جامد آلی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تجمع آن‌ها - خواهد داشت. به‌منظور بهبود سرعت فرایند هضم بی‌هوازی، افزایش کارکرد و کیفیت تولید زیست‌گاز، راهکارهای مختلفی از جمله روش‌های پیش‌تصفیه مختلف و سیستم‌های واکنشگاه مناسب مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ اما به‌طور کلی، روش پیش‌تصفیه گرمایی به‌همراه افزودن مواد قلیایی و سیستم‌های واکنشگاه دو/چندمرحله‌ای پیوسته، در صنعت کاربرد بیشتری یافته‌اند. علاوه بر این، یکی دیگر از عواملی که باعث بهبود یا اختلال در فرایند هضم بی‌هوازی می‌گردد، تغییرات شرایط عملیاتی و ترکیب خوراک (دما، pH، رطوبت، نسبت کربن/نیتروژن و دیگر شرایط و ترکیب) است.

بازیابی انرژی از هضم بی‌هوازی به‌شکل تولید زیست‌گاز صورت می‌پذیرد. این محصول به‌عنوان یک منبع انرژی ارزان قیمت و تجدیدپذیر، در مصارفی نظیر گرمایش، تولید برق، تبدیل به سوخت و سایر نقلیه و موارد دیگر مصرف می‌شود. علاوه بر این، می‌توان از جریان مواد هضم‌شده خروجی از هاضم بی‌هوازی نیز به‌عنوان یک کود مناسب جهت مصارف کشاورزی، باغبانی و اصلاح خاک استفاده نمود.

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، میزان رطوبت موجود در پسماند یکی از عوامل اثرگذار بر فرایند هضم بی‌هوازی می‌باشد (وجود حداقل ۷۰٪ رطوبت در پسماند باعث بهبود فرایند هضم آن می‌شود). طبق آمار، میزان رطوبت زباله شهر تهران برابر با ۶۱٪ است؛ بنابراین برخلاف سایر روش‌های مدیریت پسماند نظیر سوزاندن، می‌توان گفت که زباله‌های شهری ایران از نظر میزان رطوبت، برای هضم بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز و کود آلی کاملاً مناسب هستند [۲۹]. در حال حاضر شهرداری منطقه ۴ تهران، طرح هاضم بی‌هوازی میانه‌دوست را در مقیاس صنعتی (با ظرفیت ۳۰۰ تن در روز) اجرا کرده‌است تا ورود پسماندهای تر و تجزیه‌پذیر را به خاکچال کاهش دهد. در این طرح موفق شده‌اند ۷۴/۹ درصد از پسماندهای تر منطقه حکیمیه تهران را قبل از ورود به خاکچال مدیریت و دفع کنند [۳۱].

روزانه ۷۵۰۰ تن زباله از سطح شهر تهران جمع‌آوری می‌گردد که بیش از ۷۰٪ آن را زباله‌های خانگی تشکیل می‌دهند. با در نظر گرفتن ۷۰٪ ماده آلی در زباله‌های خانگی، در هر روز ۳۶۷۵ تن مواد آلی از سطح شهر جمع‌آوری می‌شود. همچنین، مقدار متوسط جامدات کل در مواد آلی زباله‌های خانگی حدود ۱۷٪ می‌باشد (جدول ۸). طبق مطالعات انجام شده، برای هضم بی‌هوازی این مقدار پسماند آلی شهری، یک واکنشگاه بی‌هوازی میانه‌دوست (۳۵ °C) و با زمان ماند حدوداً ۲۰ روز مناسب است. همچنین، محاسبات نشان می‌دهند که تحت شرایط مفروض، نرخ تولید زیست‌گاز از هر کیلوگرم جامدات کل<sup>۱</sup> موجود در زباله شهری تهران، ۵۰۰-۳۵۰ لیتر خواهد بود [۲۹].

### جدول ۸. خصوصیات کمی و کیفی پسماندهای

جامد شهر تهران [۲۹].

پارامتر	مقدار (تن در روز)
پسماندهای جامد شهری	۷۵۰۰
زباله خانگی	۵۲۵۰
پسماندهای جامد آلی	۳۶۷۵
جامدات کل	۶۲۴/۷۵

1. Total Solids (TS)

- Battimelli, A., Lyberatos, G., Ferrer, I., "Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: from lab-scale research to full-scale application", *Bioresource Technology*, 199: 386-397, (2016).
- [10] Agdag O. N., Sponza D. T., "Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors", *Journal of Hazardous Material*, 140, 75-85, (2007).
- [11] Fezzani, B., Cheick, R. B., "Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature", *Bioresource Technology*, 101, 1628-1634, (2010).
- [12] Roshani, A., Shayegan, J., Babae, A., "Methane production from anaerobic co-digestion of poultry manure", *Journal of Environmental Studies*, 38(62), 22-24, (2012).
- [13] Sasaki, D., Hori, T., Haruta, S. H., Ueno, Y., Ishii, M., Igarashi, Y., "Methanogenic pathway and community structure in a thermophilic anaerobic digestion process of organic solid waste", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 111, 41-46, (2011).
- [14] De Baere, L., "Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future?", *Water Science and Technology*, 53(8), 187-194, (2006).
- [15] Fernandez, J., Perez, L., Romero, I., "Kinetics of mesophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of initial total solid concentration", *Bioresource Technology*, 101, 6322-6328, (2010).
- [16] De Baere, L., "Anaerobic digestion of solid waste: state of the art", *Water Science and Technology*, 41(3), 283-290, (2000).
- [17] Massé, D. I., Rajagopal, R., Singh, G., "Technical and operational feasibility of psychrophilic anaerobic digestion biotechnology for processing ammonia-rich waste", *Applied Energy*, 120, 49-55, (2014).
- [18] Rajagopal, R., Bellavance, D., Rahaman, M. S., "Psychrophilic anaerobic digestion of semi-dry mixed municipal food waste: For North American context", *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 101-108, (2017).
- [19] Zhang, Y., Banks, C. J., Heaven, S., "Anaerobic digestion of two biodegradable municipal waste streams", *Journal of Environmental Management*, 104, 166-174, (2012).
- [20] Hartmann, H., Ahring, B. K., "Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure", *Water Research*, 39, 1543-1552, (2005).
- [21] Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X., "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485-1496, (2017).
- طبق مطالعات اقتصادی صورت‌گرفته، در مقایسه با روش‌های زباله‌سوزی و گازسازی، هضم بی‌هوازی پسماند جامد جهت تولید انرژی مقرون‌به‌صرفه‌تر است و علاوه بر تولید محصولات ارزشمند، به هزینه سرمایه‌گذاری کمتری نیز احتیاج دارد. با توجه به این که بخش زیادی از زباله تولیدی در ایران متشکل از زباله‌های فسادپذیر با درصد رطوبت بالا است، فرایند هضم بی‌هوازی یک راهکار مناسب برای دفع پسماندهای جامد آلی در ایران است. طبق برخی از محاسبات انجام‌گرفته، بهره‌ریزیست‌گاز تولیدی از زباله ایران قابل توجه است و می‌توان از آن در مصارف مختلف از جمله تولید برق استفاده کرد. همچنین در این زمینه با الگوبرداری از کشورهای پیشرفته اروپایی، فرایندهای والرگا، درانکو و کامپوگاز برای احداث در ایران پیشنهاد شده‌است.

## مراجع

- [1] Mata-Alvarez, J., Mace, S., Llabres, P., "Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives", *Bioresource Technology*, 74, 3-16, (2000).
- [2] Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L., "The anaerobic digestion of solid organic waste: A review", *Waste Management*, 31, 1737-1744, (2011).
- [3] Fisgativa, H., Tremier, A., Dabert, P., "Characterizing the variability of food waste quality: A need for efficient valorization through anaerobic digestion", *Waste Management*, 50, 264-274, (2016).
- [4] Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Kottner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen R., "Biogas Handbook", University of Southern Denmark Esbjerg. ISBN: 978-87-992962-0-0, (2008).
- [5] Nayono, S. E., "Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production", *KIT Scientific Publishing*, Vol.46, (2010).
- [6] Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., Lens, P. N., "Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste", *Applied Energy*, 123, 143-156, (2014).
- [7] Jain, S., Jain, S. H., Tim Wolf, I., Lee, J., Tong, Y. W., "A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 142-154, (2015).
- [8] Cesaro, A., Belgiorno V., "Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions: A review". *Chemical Engineering Journal*, 240, 24-37 (2014).
- [9] Carrere, H., Antonopoulou, G., Affes, R., Passos, F.,

- [22] Deublein, D., Steinhauser A., "Biogas from waste and renewable resources: an introduction", John Wiley & Sons, (2011).
- [23] Fernandez J, Perez M, Romero L. I., "Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology*, 99(14), 6075–8, (2008).
- [24] Babaei, A., Shayegan, J., "Effects of temperature and mixing modes on the performance of municipal solid waste anaerobic slurry digester", *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1-8, (2020).
- [25] Chen Y, Cheng J. J., Creamer K. S., "Inhibition of anaerobic digestion process: a review", *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–64, (2008).
- [26] Jerry, R., Taricska, David, A., Long, J., Paul C. H., Yung-Tse H., Shuai-Wen Z., "Anaerobic digestion", *Handbook of Environmental Engineering, Biological Treatment Processes*, 8, 589-634, (2009).
- [27] Liangcheng, Y., Fuqing, X., Xumeng, G., Yebo, L., "Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 824-834, (2015).
- [28] European Commission, "Digestate and compost as fertilisers: Risk assessment and risk management options", *Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited*, (2019).
- [۲۹] کمالان، ح. ر.، عمرانی، ق.، منوری، م.، سعیدی، ن.، "بررسی نحوه و میزان استحصال انرژی از مواد زائد جامد شهری در ایران از طریق فناوری‌های هضم بی‌هوازی"، *دومین کنفرانس بی‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی (۱۳۹۱)*.
- [30] Babaei, A., Shayegan, J., "Anaerobic digestion of vegetable waste", *Chemical Engineering Transactions*, 24, 1291-1296, (2011).
- [۳۱] فیاض، س. م.، نقوی، ر.، مالمیر، ط.، "استحصال انرژی از پسماندهای شهری به روش هاضم (مطالعه موردی: پروژه هاضم منطقه ۴ شهرداری تهران)"، *سومین همایش ملی مدیریت پساب و پسماند صنعتی (در صنایع نفت و انرژی)*، تهران، (۱۳۹۱).