مطالعات علوم زیستی و زیست فناوری

دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳

صفحات ۱۲۴-۱۰۱

Online ISSN: ۲۴۷۶-۴۴۹۳

Print ISSN: ۲۵۳۸-۲۰۲۰

www.irijournals.com

بازیابی مواد و انرژی با رویکرد هضم بی هوازی پسماندهای جامد شهری و هضم لجن و فاضلاب

امیرحسین خوارزمی خراسانی

دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش مهندسی محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

این مقاله بدنبال بررسی بازیابی مواد و انرژی در پرتو هضم بی هوازی پسماندهای جامد شهری و هضم لجن و فاضلاب به روش علمی می باشد. در چند دهه اخیر منابع تجدیدپذیر انرژی که باعث آلودگی کمتر محیط‌زیست شوند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان استحصال و بازیابی مواد و انرژی از ضایعات آلی جامد شهری برای تولید انرژی به دلیل کنترل گازهای گلخانه‌ای و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه هضم بی‌هوازی به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های مواجهه با پسماندهای آلی جامد شهری مطرح است، با این حال، این فرآیند دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. از این‌رو هضم بی هوازی یکی از روش های تصفیه و مدیریت پسماندهای جامد آلی بوده و به‌عنوان راهکاری به منظور بازیابی ماده و انرژی از پسماند به شمار می رود. از دگر سو دفن بهداشتی پسماند در خاکچال ها به دلیل سادگی و صرفه اقتصادی بسیار رایج بوده، اما بدیهی‌است که این کار باعث آسیب رسانی به محیط زیست، از بین رفتن بخش زیادی از منابع با ارزش موجود در پسماند و افزایش هزینه های تصفیه شیرابه خواهد شد. هضم بی هوازی در اکوسیستمهای طبیعی نیز مانند مردابها، ته نشینهای کف دریا و یا سیستمهای غیر طبیعی نظیر تصفیه خانه های فاضلاب، سیستمهای تصفیه هضم لجن و کود اتفاق می افتد. معمولاً تولید متان آخرین مرحله تصفیه فاضلاب به روش بی هوازیست که از تولید و تجمع مقادیر زیاد مواد آلی در سیستمهای بی هوازی ممانعت بعمل می آورد. تجزیه مواد آلی به روش بی هوازی روشی متابولیکی است که در آن تجزیه مواد با راندمان کمتری تا روش هوازی انجام می گیرد. ارگانیسمهای بی هوازی معمولاً انرژی زا هستند و اغلب محصولات نهائی حاصل از فعالیت آن ها با ارزش است. یافته ها گویای این است که هضم بی هوازی یک فرایند مناسب برای دفع پسماندهای شهری در ایران تلقی می‌گردد که می‌توان از زیست‌گاز تولیدی و مواد هضم‌شدهٔ آن استفاده نمود. به‌منظور مدیریت پسماند راهکارهایی از قبیل استفادهٔ مجدد، بازیابی منابع و بازیافت ارائه شده است. از مهم ترین فواید فرآیندهای بی هوازی در تصفیه فاضلاب می توان به عدم نیاز به تجهیزات مکانیکی برای هوادهی فاضلاب از قبیل هواده

مطالعات علوم زیستی و زیست فناوری

دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳

صفحات ۱۲۴-۱۰۱

Online ISSN: ۲۴۷۶-۴۴۹۳

Print ISSN: ۲۵۳۸-۲۰۲۰

www.irijournals.com

سطحی شناور و ثابت و هواده عمقی، نیاز به فضای کمتر برای نصب و راه اندازی پکیج تصفیه، تولید لجن کمتر نسبت به سایر روش های هوازی، تولید بیوگازها و مصرف متان تولیدی در سایر صنایع به عنوان سوخت، مصرف انرژی کم، عدم نیاز به تغذیه منظم و دوره ای به منظور زنده نگهداشتن لجن برخلاف روش های هوازی، راندمان بالا در حذف BOD و COD در فاضلاب های صنعتی و بهداشتی، مقاومت بالا در برابر شوک آلی و هیدورلیکی اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: مواد و انرژی، هضم لجن و فاضلاب، هضم بی هوازی، پسماندهای جامد شهری

مقدمه

زیست بشری در شرایط کنونی که همراه با توسعه گسترده ماشین و تأثیرات آن بر محیط شهری که مکان استقرار انسان معاصراست و دارای مشکلات وپیچیدگی های ناشی از توسعه روزافزون صنعتی وبروز گرفتاریهای آن در پدیده بهداشت محیط می باشد. این توسعه که منجر به تولید انبوه کالاها و لوازم و در نتیجه تولید گسترده پسماندها درسطح شهرهای بزرگ و کلان شهرها شده است مدیریت شهری را به چالشی اساسی در مدیریت مواد زائد شهری کشانده است.امروزه جهت رفع مشکلات بهداشتی و زیست محیطی ناشی از جمع‌آوری زباله های کلان شهری نظیر تهران که روزانه در حدود ۸۰۰۰ تن بالغ می‌گردد بدون ارایه راهکار و تعامل و مشارکت شهروندان با مدیریت شهری امری اجتناب ناپذیر است و تنها راه حل مناسب و عملی جهت تحقق امر بازیافت پسماندهای شهری اجرای تفکیک از مبدأ است که به نسبت سایر طرح‌های مدیریت مواد زائد کارآمدی خود را نشان داده است. هضم بی هوازی در واقع تخمیر باکتریایی ضایعات مواد آلی در غیاب اکسیژن است. که مزایای متعددی همچون؛ تولید لجن کمتر، انرژی مصرفی کمتر و تولید انرژی قابل توجه میباشد. هضم بی هوازی در محفظه ای به نام هاضم انجام می شود از متداول ترین فرایندهای موجود در این هاضم ها می توان به انواع مختلف، شامل بی هوازی کم جامد، بیه وازی جامدبالا، درانکو، کمپوگاز و والورگا اشاره کرد. روشها ی هضم بی هوازی به عنوان یکی از مهمترین روشهای مدیریت ضایعات جامد شهری می تواند در راستای کمک به ایجاد ساختارهای مورد نیاز برای فراوری و بازیابی مواد جامد به عنوان کود در کشاورزی بکار رود، گاز تولید شده جهت مصرف در نیروگاه ها مورد استفاده قرار می گیرد و علاوه بر این به عنوان روشی برای کاهش حجم ضایعات و تبدیل آن به مواد کم خطر و یا بی خطر تلقی میگردد.همچنین تصفیه بی هوازی فاضلاب یا هاضم بی هوازی لجن از رایج ترین شیوه ها برای حذف مواد جامد آلی در پساب های صنعتی و بهداشتی می باشد که با توجه به محدودیت های موجود در روش های هوازی، در اغلب تصفیه خانه ها مورد استفاده قرار میگیرد. در این روش مواد آلی معلق، پروتئین ها، چربی ها و کربوهیدرات ها پس از هیدورلیز شدن به اسیدهای چرب، آمینو اسیدها و قندها تبدیل می گردند. این مواد در مرحله اسیدی شدن و استات به جوهر نمک و سرکه تبدیل شده و در نهایت منجر به تولید بیوگاز متان می گردند که در سایر صنایع مختلف به عنوان سوخت قابل استفاده خواهند بود. از مهم ترین ویژگی ها و دلایلی که باعث شده اند تصفیه فاضلاب به روش های بی هوازی با استقبال بیشتری نسبت به روش های لجن فعال و هوازی مواجه شوند، تولید لجن کمتر و مصرف انرژی و هزینه کم می باشد.به طور کلی، پسماند جامد آلی به ضایعات آلی زیست‌تخریب‌پذیری اطلاق می گردد که میزان رطوبت آن ها کمتر از ۹۰-۸۵٪ باشد؛ با توجه به این تعریف، بسیاری از پسماندهای کشاورزی، غذایی، صنعتی و نیز لجن های حاصل از فاضلاب شهری در این دسته قرار می گیرند. (Skiadas.2005:67) روش هضم بی هوازی یکی از سودمندترین روشهای فرآوری و تصفیه بخش آلی پسماندهای جامد شهری می باشد. این فرایند دربرگیرندۀ مجموعه ای از واکنش های سوخت‌وسازی است که می توانند به طور طبیعی در خاکچال ها رخ دهند؛ اما در این صورت با آزادسازی مواد مضر برای محیط زیست- از جمله شیرابه و گازهای مختلف، نظیر متان و دی اکسید کربن، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، آمونیاک و اسیدهای چرب فرار- همراه خواهند بود. از طرفی با انجام این فرایند تحت شرایط کنترل شده، می توان محصولات باارزشی مانند سوخت زیستی و مواد اصلاح کنندۀ خاک (کمپوست) تولید نمود. (Raposo.2012: 421)

۱-فواید هضم بی هوازی نسبت به هضم هوازی در بازیابی مواد و انرژی و هضم لجن و فاضلاب

از مزایای فرایند بی هوازی نسبت به فرایندهای هوازی مـی تـوان بـه نیاز به انرژی کمتر و تولید زیست تودۀ کمتر اشـاره کـرد؛ همچنـین هضم بی هوازی می تواند آلودگی محیط زیست را از دو جهت کـاهش دهد: محیط پوشیدۀ ایـن فراینـد از خـروج گـاز متـان بـه اتمسـفر جلوگیری می کند؛ این درحالی است که در فرایند هـوازی انتشـارات غیرقابل کنترل و زیادی از ترکیبات فرار نظیر کتـونهـا، آلدهیـدهـا، آمونیاک و متان متصاعد می‌گردد. (Rafique.2010: 35)

با توجه به کارایی فرایند هضم بی هوازی به عنوان روشی عملی بـرای مدیریت پسماندهای جامد شهری و بازیـابی مواد و انرژی و هضم لجن و فاضلاب، در ایـن مقاله سعی بر آن است تا مروری بر جنبه‌های مختلف ایـن فراینـد و بازیابی مواد و انرژی و هضم لجن و فاضلاب از آن صورت گیرد. از مهم ترین مزایای فرآیندهای بی هوازی در تصفیه فاضلاب می توان به موارد زیر اشاره نمود:

عدم نیاز به تجهیزات مکانیکی برای هوادهی فاضلاب از قبیل هواده سطحی شناور و ثابت و هواده عمقی

نیاز به فضای کمتر برای نصب و راه اندازی پکیج تصفیه

تولید لجن کمتر نسبت به سایر روش های هوازی

تولید بیوگازها و مصرف متان تولیدی در سایر صنایع به عنوان سوخت

مصرف انرژی کم

عدم نیاز به تغذیه منظم و دوره ای به منظور زنده نگهداشتن لجن برخلاف روش های هوازی

راندمان بالا در حذف BOD و COD در فاضلاب های صنعتی و بهداشتی

مقاومت بالا در برابر شوک آلی و هیدورلیکی

۲-مهمترین فواید مواد هضم شـدۀ بـه دسـت آمـده از فراینـد هضـم بی هوازی

برخی از مهم ترین تغییراتی که در هضم بی هوازی بر مواد هضم‌شـده ایجاد می‌شود، عبارت است از:

۲-۱-کاهش بو

طی هضم بی هوازی، بوی نامطبوع حاصـل از مـواد بـدبو (اسـیدهای فرار، فنول و مشتقات آن) تا حد چشمگیری کـاهش مـی یابـد. ایـن مسأله تنها به معنـای کـاهش شـدت و مانـدگاری بـو نیسـت، بلکـه تغییرات مثبتی نیز در ترکیب این بوها حاصل خواهدشد؛ زیـرا مـواد هضم شده دیگر حاوی مواد دوغابی شکل با بـوی بـد نیسـت و بـویی شبیه به آمونیاک دارد. حتی درصورت نگهداری طولانی مـدت، بـوی نامطبوعی از مواد هضم‌شده متصاعد نخواهدشد. (Prorot.2011: 188).

۲-۲-بهداشتی‌سازی

فرایند هضم بی هوازی قادر به غیرفعال سازی ویروس ها، باکتری هـا و انگل های موجود در خوراک می باشد که تحت عنوان بهداشتی سـازی شناخته می‌شود. کارکرد بهداشتی‌سازی هضم بی هوازی به زمان ماند واقعی خوراک در هاضم، دمای فرایند، نحـوۀ اخـتلاط و نـوع هاضـم بسـتگی دارد. بهتـرین بهداشـتی‌سـازی در دماهـای گرمادوسـت (۵۵-۵۰ °C) و در یک واکنشگاه لوله ای طولانی با زمان اقامت کافی حاصل خواهدشد. در این نوع هاضم، بین مواد هضم شـده و خـوراک تازه هیچ اختلاطی صورت نمی گیرد و به همین دلیل حداکثر ۹۹٪ از عوامل بیماری‌زا حذف می‌گردند. (Penaud.1999:258)

اخیر، تلاش های بسیاری برای استفاده از ایـن مـاده در کاربردهـایی همچون اصلاح خاک و یا تولید کود صورت گرفتـه اسـت. همچنـین می توان مواد هضم شده را در کارخانـه هـای کمپوسـت سـازی مـورد فرآوری قرار داد تـا بتـوان بـدین وسـیله موجـب افـزایش محتـوای مواد جامد، کاهش بیشتر عوامل بیماری‌زا و تولید کمپوست صـنعتی شد. (Pavan.2000:75) از طرفی، معمـولاً مـواد هضـم شـده در هضـم بـی هـوازی دارای محتوای رطوبت زیاد و مقدار قابل توجهی اسیدهای چرب فرار می باشند که برای گیاهان سمی است. همچنین اگر عمـل هضـم در شرایط دمـایی گرمادوسـت انجـام نشـده باشـد، ایـن مـواد از نظـر بهداشتی مشکل‌ساز خواهند بود. بنابراین به‌منظور تثبیت بیشتر مواد هضـم‌شـده و دسـتیابی بـه محصـولی بـا کیفیـت بـالا بایـد بعـد از هضم بـی هـوازی از یـک مرحلـه هضـم هـوازی اسـتفاده نمـود. (Panda.2008: 18) لازم به ذکر است که باتوجه به محتوای مواد اولیه موجود در خوراک هاضم بی هوازی، مواد هضم شده و سایر محصولات جانبی این فرایند می توانند شامل پلاستیک، فلزات سنگین و سایر مواد غیرآلی باشـند که در حد مجاز آلایندههای موجـود در موادهضـم شـده جهت مصارف کشاورزی و رهـا شـدن در محـیط آورده شـدهاسـت. فلزات سنگین، ریزپلاستیک‌ها و سایر آلایندههای آلـی، محـدودیتی در مصرف مستقیم مواد هضم‌شده به‌عنـوان کـود ایجـاد مـی‌کننـد؛ بنابراین در چنین شرایطی پـیش از رهـاکردن مـواد هضـم شـده در محـیط (بـه‌صـورت کـود و یـا دفـن بهداشـتی در خاکچـال)، بایـد فرآوری های دیگری نیز روی این مـواد صـورتگیـرد. یکـی دیگـر از مسائل هضم بی هوازی که می تواند بر مواد هضم‌شـده اثـر نـامطلوبی بگذارد، اضافه کردن موجودات اصلاحشدهٔ ژنتیکی به‌منظـور افـزایش بازدهی تولید و کارکرد هضم است. با رهاسازی مـواد هضـم شـده در محـیط (بـه صـورت کـود و یـا دفـن بهداشـتی در خاکچـال)، چنین موجوداتی می توانند با سایر ریزاندامهـای طبیعـی خـاک وارد رقابت شوند و با کاهش تنوع آن ها منجـر بـه ایجـاد اثـرات مخربـی گردند. بنابراین علی رغم کاربردهای مواد هضم شده، باید در رابطه بـا مسائل فوق، جوانب احتیاط را رعایت نمود. (Neyens.2003: 51)

۲-۳- بهبود کودسازی

حـین فراینـد هضـم بی هوازی، پیونـدهای آلـی موجـود در اکثـر مواد مغذی، به ویژه نیتروژن، شکسته شـده، درنتیجـه مـواد معـدنی به آسانی در دسترس گیاهان قـرار خواهـدگرفت. بـه همـین دلیـل در مقایسه با دوغاب هضم نشده، اعمال مواد هضم شده بـر خـاک باعـث ایجاد تنش کمتر و فراهم آوردن محیط مناسب تری برای موجـودات خاکی می گردد. مواد هضم شده در هضم بی هوازی معمولاً غنی از مواد مغذی نظیر نیتروژن و فسفر می باشـند (.Pavan.2000:85)

۲-۴-امکان پذیری هضم بی هـوازی پسـماندهای جامـد در ایران و بصرفه تر بودن آن نسبت به روش هـای زباله سوزی و گازسازی

طبـق مطالعـات اقتصـادی انجـامگرفتـه، در مقایسـه بـا روشهـای زباله سوزی و گازسازی، تولید انرژی از پسماندهای جامد با اسـتفاده از روش هضم بی هوازی مقرون به صـرفه تـر اسـت و عـلاوه بـر تولیـد محصولات ارزشمند، به هزینه سرمایه گـذاری کمتـری نیـز احتیـاج دارد. به طورکلی فراینـد هضـم بـی هـوازی در کشـورهای پیشـرفته، به ویـژه کشـورهای اروپـایی، بـه سـرعت در حـال گسـترش اسـت و زیست گاز تولیدی در این فرایند بـه عنـوان یـک منبـع انـرژی پـاک مورد استفاده قرار گرفته‌است. (Mottet.2009: 169)

۳-مفاهیم

۳-۱-هضم بی هوازی

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

•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 آماده سازی

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

پسماندهای صنعتی و تجاری مشابه

•لجن فاضلاب (Mirmasoumi.2018: 219)

۳-۱-۱-تئوری هضم بی هوازی

هضم بی هوازی عبارت است از تجزیه مواد آلی وغیر آلی درغیاب اکسیژن. کاربرد های اصلی این فرایند،تثبیت لجن های غلیظ حاصل از تصفیه فاضلاب و تصفیه برخی مواد زاید صنعتی می باشد. هضم بی هوازی متشکل از چندین مرحله متوالی واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی تشکیل‌شده است که شامل آنزیم‌ها و محیط مختلط میکرو ارگانیسم‌ها می‌شود.

در این فرایند تجزیه لجن بدین ترتیب است که مواد آلی طی سه مرحله به موارد ریزتر تبدیل‌شده و نهایتا خروجی به شکل گاز متان و گازهای مختلف از سیستم به همراه مواد تجزیه‌شده خارج می‌شود.

همان‌طور که گفته شد این فرایند شامل سه فاز کلی می‌باشد

- هیدرولیز
- اسیدسازی
- متان سازی (Mirmasoumi.2018: 229)

فاز اول: هیدرولیز

در این فاز ترکیبات پیچیده‌ای مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین ها و لیپید ها به شکل حل‌شدنی تبدیل و به منومر های ساده هیدرولیز می‌شود. هیدرولیز یک مرحله محدودکننده‌ی سرعت در فاز اسیدسازی است.

فاز دوم: اسیدسازی

در این فاز باکتری‌های بیماری زا اسید ساز محصولات فاز اولیه را به اسیدهای آلی با زنجیره کوتاه مانند استیک اسید، پروپیونیک اسید و لاکتی; اسید و لاکتیک اسید و هیدروژن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌کنند.

فاز سوم: متان سازی

باکتری‌های متان ساز اسیدهای فرار را به متان تبدیل می‌کنند. این فاز آخرین مرحله در تجزیه مواد الی به شکل بی هوازی می‌باشد.

ویژگی‌های باکتری‌هایی که در سه فاز مزبور نقش دارند باکتری‌های تشکیل دهنده‌ی اسید به همراه باکتری‌های تشکیل دهنده‌ی متان بیشترین نقش را در فرایند هضم بی هوازی لجن ایفا می‌کنند. این میکرو ارگانیسم‌ها شامل باکتری‌های بی هوازی اختیاری (که ترکیبات آلی محلول و ساده را تخمیر می‌کنند) و باکتری‌های بی هوازی مطلق (که کربوهیدرات‌ها و پروتئین ها را تجزیه می‌کنند) می‌باشند. کیفیت فرایند تجزیه لجن در شرایط بی هوازی به شرایط محیطی و سازوکار باکتری‌ها بستگی دارد لذا تغییر در شرایط بهره‌برداری که منجر به تغییر گونه‌های غالب باکتریایی می‌شود باعث تغییر در غلظت اسیدها و الکل‌ها به طور قابل توجهی میزان سوبسترا های موجود برای باکتری‌های تشکیل دهنده متان و فعالیت آنها و در نتیجه عملکرد هاضم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. (McLeod .390 :2015)

الف: باکتری‌های اسید ساز

این‌گونه از باکتری‌ها در اجرای فاز دوم تخمیر نقش اساسی دارند. این‌گونه از باکتری‌ها دارای زندگی مسالمت آمیزی با باکتری‌های تولیدکننده‌ی متان هستند.

اسید ساز ها اغلب باکتری‌های اختیاری هستند و در برابر تغیرات PH و دما نسبتاً مقاوم هستند. باکتری‌های اختیاری می‌توانند از اکسیژن محلول در متابولیسم استفاده کنند.

اسید ساز ها زمان تقسیمی در حدود چند ساعت دارند و می‌توانند در شرایط مختلف محیطی عمل کنند.

ب: باکتری‌های متان ساز

باکتری‌های تولیدکننده متان نام‌های مختلفی دارند و ازنظر مرفولوژی (ریخت‌شناسی) گروه متفاوتی از ارگانیسم‌ها هستند که دارای شکل‌ها، الگوی رشد و اندازه‌های متنوعی هستند

این باکتری‌ها در دمای های بالا به خوبی رشد می‌کنند. این‌گونه از باکتری‌ها حساس به اکسیژن هستند وبی هوازی اجباری هستند.

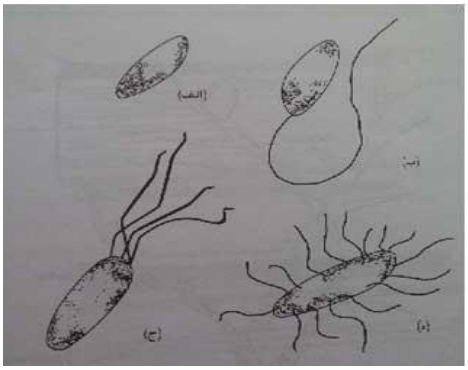
نام‌های رایج که برای این‌گونه در نظر می‌گیرند:

متانوژیک ها

متانوژن ها

متان سازها

برخی از اشکال این باکتری‌ها در تصاویر زیر نمایان است:



متان سازها ذاتا آهسته رشد می‌کنند و سرعت تقسیم آنها چند روز است و همچنین تغییرات کم PH و دما تأثیرات مضری بر آنها دارد. زمانی که هاضم تحت استرس نوسانات دمایی یا بار شوک قرار می‌گیرند تولید متان نسبت به تولید هیدروژن و اسید به تأخیر می‌افتد. در سیستم‌های هضم بی هوازی لجن اسیدسازی و متان سازی در تعادل پویا قرار دارند، به این معنی که بعد از تبدیل مواد آلی به اسیدهای فرار و هیدروژن، این مواد با همان نرخی که تشکیل شده‌اند به متان و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند. بنابراین در هاضم که خوب کار می‌کند مقدار هیدروژن و اسیدهای فرار کم است. (Marin.2010:30)

۳-۱-۲-عوامل محیطی مؤثر بر واکنش‌های بی هوازی

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر واکنش‌های بی هوازی عبارت اند از:

- زمان ماند مواد جامد(SRT)
- زمان ماند هیدرولیکی(HRT)
- دما
- PH
- قلیاییت
- وجود مواد سمی
- SRT

مهم‌ترین عامل در هاضم بی هوازی این است که باکتری‌ها زمان کافی برای تکثیر و سوخت ساز مواد جامد فرار را در اختیار داشته باشند.

SRT: زمان میانگینی است که مواد جامد در هاضم می‌مانند. سه واکنش سیستم هضم بی هوازی به طور مستقیم به این پارامتر مرتبط است. با افزایش SRT میزان توسعه واکنش‌ها زیاد می‌شود و بالعکس.

با کاهش SRT غلظت اجزای لجن خروجی به تدریج زیاد می‌شود تا اینکه مقدار SRT به حدی برسد که پس از آن غلظت به سرعت افزایش می‌یابد.

در سیستم‌های هاضم لجن بی هوازی SRT و HRT برابر در نظر گرفته می‌شود و تأثیرگذاری مشابه در سیستم دارند.

دما: دما اثر مهمی در نرخ رشد باکتری‌ها می‌گذارد از این رو بین SRT و عملکرد هاضم را تغییر می‌دهد. دمای ۲۰ درجه سانتی گراد حداقل دمایی است که می‌توان لجن را تثبیت کرد. بیشتر هاضم ها در دمای ۳۰ تا ۳۸ درجه‌ی سانتی گراد کار می‌کنند.

حفظ دمای بهره‌برداری پایدار در هاضم، مهم است. نوسانات مکرر و شدید دما روی باکتری‌ها به ویژه متان سازها اثر می‌گذارد.

PH و قلیاییت: باکتری‌های متان ساز به شدت به PH حساس اند PH.بهینه برای متان سازها حدود ۶.۸ تا ۷.۲ است. اسیدهای تولیدشده در فاز اسیدسازی PH را کاهش می‌دهند. متان سازها با تولید قلیاییت به صورت دی‌اکسید کربن آمونیاک و بی‌کربنات با این کاهش مقابله می‌کند. (Maghanaki.2013:714)

۳-۲-پیشینه ی پژوهشی در هضم بی هوازی ترکیبی

هضم بی هوازی ترکیبی یا تخمیر ترکیبی عبارت است از اختلاط پسماندهای مختلف با یکدیگر و استفاده از آن ها به عنوان خوراک هاضم بی هوازی. از مزایای این روش می توان به رقیق سازی ترکیبات سمی، افزایش بار مواد آلی زیست تخریب پذیر، بهبود تعادل مواد مغذی موجود، افزایش بازدهی تولید زیست گاز، افزایش نرخ هضم و تثبیت مواد و فراهم کردن رطوبت موردنیاز در خوراک هاضم اشاره کرد البته، معایبی نیز در این فرایندوجود دارد که عمدتاً ناشی از هزینه های بالای انتقال دوغاب و مشکلات هماهنگ سازی مقررات مختلف تولیدکنندگان پسماند است.

(Liu, X., W. Wang, X. Gao, Y. Zhou, and R. Shen. 2012.43)

در این زمینه تحقیقات زیادی از طریق هضم بی هوازی مخلوطی از پسماندهای کشاورزی، شهری و صنعتی صورت گرفته‌است. آگداگ و اسپونزا (۲۰۰۷) مشاهده کردند که هضم ترکیبی پسماند جامد شهری با لجن صنعتی با نسبت ۲:۱ در مقایسه با هضم پسماند جامد شهری به تنهایی، منجر به حصول بیشترین بازدهی گاز متان می گردد به طور مشابه، فزانی و شیخ (۲۰۱۰) در یک سیستم هضم بی هوازی 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 اصلاح کنندهٔ خاک مورد استفاده قرارگیرد در مطالعه دیگری، روشنی و همکاران (۱۳۹۱) هضم بی هوازی ترکیبی مخلوطی از پسماند مرغداری و کاه 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 .باوجود برتری های یادشده برای فرایند هضم بی هوازی ترکیبی و نیز تحقیقات بسیاری که در این زمینه صورت گرفته، این فرایند به طور گسترده به صنعت راه نیافته است. افزودن مقادیر کمی از یک خوراک کمکی[۳] جامد آلی به هاضم های فضولات بسیار رایج است؛ اما معمولاً این خوراک ها به شکل لجن های صنعتی با بازدهی انرژی بالا هستند و به ندرت از پسماند جامد خانگی یا پسماندهای بازاری برای این کار استفاده می‌شود، زیرا پسماند جامد اصولاً نیازمند فرآوری و پیش فرآوری خاصی است. مچنین،ه معمولاً پسماندهای جامد منجر به آلودگی فضولات با انواع مختلفی از فلزات سنگین و ناخالصی هایی می‌شوند که به‌طور طبیعی در محیط فضولات یا لجن وجود ندارند. افزودن فضولات یا لجن به هاضم های پسماند جامد نیز به دلایل اقتصادی، بسیار محدود می باشد و همچنین پسماند مایع باعث تولید فاضلابی خواهد شد که نیازمند تصفیه مجدد است.

۳-۳-مفهوم هضم بی هوازی فاضلاب

هضم بی هوازی یکی از قدیمی ترین و پر کاربرد ترین فرایند های تثبیت لجن فاضلاب در تصفیه خانه های با دبی بیش از ۲۰۰۰۰ متر مکعب در روز، است. این فرایند مواد جامد الی در لجن را در غیاب اکسیژن به محصولات نهایی مانند متان، دی اکسید کربن و مواد بی ضرر تبدیل می کند. کاهش کلی مقدار مواد جامد و نابودی پاتوژنها نیز در فرایند انجام می گیرد. در محیط زیست طبیعی مواد آلی و معدنی مرتباً به مواد مختلفی در اثر فعل و انفعالات شیمیایی و بیولوژیکی تبدیل می شوند. بعضی از این فعل و انفعالات با زندگی عمومی موجودات زنده همراهی می گردد. بعنوان مثال در یک آب پذیرنده میکروارگانیسمهائی زندگی می کنند که باعث تجزیه و شکسته شدن مولکولهای کمپلکس با مصرف اکسیژن محیط می شوند. وقتی مواد غذائی برای زندگی میکروارگانیسم ها زیاد باشد شدت رشد آن ها زیادتر از تخلیه اکسیژن محیط خواهد بود و ناچاراً موجودات آبی نظیر ماهی بعلت کاهش اکسیژن قادر به ادامه حیات نخواهند بود. حفظ محیط زیست ایجاب می نماید تا تخلیه آلودگیها مخصوصاً مواد مغذی در آب های پذیرنده طبق قاعده و قانون انجام گیرد تا باعث تخلیه بیش از حد اکسیژن نگردد. رسیدن به این مطلب لازمه اش این است که اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم ها برای شکستن آلودگیهای تخلیه شده مدنظر قرار گیرد، بنابر این یکی از اهداف مهم تصفیه فاضلاب تقلیل یا کاهش اکسیژن مورد نیاز تصفیه فاضلاب است.

برای تعیین اکسیژن مورد نیاز تصفیه فاضلاب BOD، COD آن باید تعیین شود. متذکر می شود در تعیین BOD به زمانی حدود ۵ روز نیاز داریم، در حالیکه اندازه گیری COD در کمتر از دو ساعت انجام پذیر است. هر دوی این آزمایشات که نتایج آن ها به حسب میلی گرم در لیتر بیان می شود تعیین کننده میزان اکسیژن مورد نیاز برای اکسیداسیون آلودگیهاست. به عنوان مثال اگر فاضلابی به میزان ۱۰۰۰ لیتر و ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر BOD به آب پذیرنده تخلیه گردد، حدود ۲ کیلو اکسیژن برای غلبه بر اکسیداسیون آلودگیها مورد نیاز است. با کمی دقت دیده می شود که برای تأمین این مقدار اکسیژن چه میزان آب باید جابجا شود و چه بسا در اثر این مسائل زندگی موجودات آبی با خطر نابودی مواجه گردد.

تصفیه بی هوازی روشی است که در آن میکروارگانیسمها در غیاب اکسیژن محلول فعالیت می نمایند. در حین تصفیه مواد آلی (مواد مولد COD،BOD) طی چند مرحله به بیوگازی که قسمت عمده آن متان و گاز کربونیک است تبدیل شده و همزمان در محیط تصفیه مقادیر کمی توده بیولوژیکی که در حقیقت باکتریهای جدید هستند بوجود خواهد آمد.

از نظر تاریخی در ۱۷۷۰ VOLTA مشاهده کرد که در مردابها هوای غیر قابل اشتعالی تشکیل می گردد. این شخص پیدایش این گازها را نتیجه تجزیه مواد آلی دانست ولی نتوانست توضیحی در این مورد بیان نماید. در ۱۸۰۶ BECHAMP اولین کسی بود که برای تولید متان فعالیتهای میکروبیولوژیکی را دخیل دانست. تا ۱۸۷۵ یعنی زمان کارهای مطالعاتی POPPOF تولید متان بطرق مختلف مورد مطالعه قرار داشت ولی بجز اطلاع از اثرات عوامل میکروبیولوژیکی در تولید آن کشف علمی خاصی صورت نگرفت. در ۱۹۰۶ SOHNGEN موفق به کشف دو نوع باکتری مولد متان (, ROD – LIKE SARGINA) گردید. بعدها تجزیه بی هوازی توسط میکروارگانیسمها مورد توجه SCHNELLEN قرار گرفت و این شخص در دانشگاه DELFT برای اولین بار ارگانیسمهای مولد متان را (METHANOGENIC ORGANISMS) جدا نمود.

در ۱۹۶۷ BRAYANT معلوم نمود که در تبدیل اتانل به متان دو نوع باکتری دخالت دارد، یکی از باکتریها اتانل را به استات و هیدروژن و دیگری با مصرف هیدروژن CO_2 را به متان تبدیل می نماید. هضم بی هوازی در اکوسیستمهای طبیعی نیز مانند مردابها، ته نشینهای کف دریا و یا سیستمهای غیر طبیعی نظیر تصفیه خانه های فاضلاب، سیستمهای تصفیه هضم

لجن و کود اتفاق می افتد. معمولاً تولید متان آخرین مرحله تصفیه فاضلاب به روش بی هوازیست که از تولید و تجمع مقادیر زیاد مواد آلی در سیستمهای بی هوازی ممانعت بعمل می آورد. تجزیه مواد آلی به روش بی هوازی روشی متابولیکی است که در آن تجزیه مواد با راندمان کمتری تا روش هوازی انجام می گیرد. ارگانیسمهای بی هوازی معمولاً انرژی زا هستند و اغلب محصولات نهائی حاصل از فعالیت آن ها با ارزش است. Liu, G., R. Zhang, H. M. El-Mashad, and R. Dong. (2009.44-45)

بعنوان مثال فرمانتاسیون قند تولید الکل و اسید استیک می کند و یا متلاشی شدن اسید استیک با متان زائی توأم است، در حالی که همین مواد در تجزیه هوازی کلاً به آب و CO_2 تبدیل خواهند شد. متان که محصول آخرین تصفیه بی هوازیست چنان ماده پرارزشی است که بشر از آن بعنوان سوخت استفاده می نماید. زیبائی تصفیه بی هوازی در این است محصول نهائی روش تصفیه یعنی متان بسیار نامحلول است و بطور اتوماتیک از فاز مایع جدا می گردد. راندمان انرژی کم بوسیله بی هوازیها در مقایسه با هوازیها در مدت مصرف مواد بدین معنی است که در بی هوازیها انرژی کمتری برای تولید سلولهای جدید موجود است که مالاً باعث تولید لجن های کمتری خواهد شد. معنی دیگر این موضوع این است که تکثیر بی هوازیها کندتر از هوازی ها انجام خواهد شد. با وجود این میزان متابولیکی کند بی هوازیها باعث پیدایش لایه های به هم چسبیده و وزین توده های بیولوژیک خواهد شد.

۳-۳-۱-مفهوم لجن و فاضلاب در فرایند هضم هوازی

به مخلوطی از مواد جامد ومایع به دست آمده در طی فرآیند تصفیه فاضلاب، لجن گفته می شودکه به علت خطراتی که برای سلامتی انسان ومحیط زیست دارد بایدقبل از دفع در محیط آن را تصفیه نمود.رایج ترین روش تثبیت لجن تجزیه ی بیولوژیکی آن به دوصورت هضم هوازی و بی هوازی است.هضم بی هوازی عبارت است از تجزیه مواد آلی وغیر آلی درغیاب اکسیژن. کاربرد های اصلی این فرایند،تثبیت لجن های غلیظ حاصل از تصفیه فاضلاب و تصفیه برخی مواد زاید صنعتی میباشد.در حال حاضر مواد زاید آلی رقیق رانیز میتوان به روش بی هوازی تجزیه نمود.در فرایند هضم بی هوازی،مواد آلی درون مخلوط های لجن ته نشینی اولیه ولجن بیولوژیکی باروش های بیولوژیکی وتحت شرایط بی هوازی،به انواع گوناگونی از محصولات نهایی چون متان،مواد تثبیت شده وکربن دی اکسید تبدیل می شود. این فرایند را در راکتور های بی هوابندی شده انجام می دهند.هضم بی هوازی دارای سه مرحله،پیش تصفیه،هضم و پس تصفیه است. (J. Li, H. Li, and Z. Yu. 2016:122)

۴-فرآیند تصفیه بی هوازی فاضلاب

تصفیه بی هوازی فاضلاب یا هاضم بی هوازی لجن از رایج ترین شیوه ها برای حذف مواد جامد آلی در پساب های صنعتی و بهداشتی می باشد که با توجه به محدودیت های موجود در روش های هوازی، در اغلب تصفیه خانه ها مورد استفاده قرار میگیرد. در این روش مواد آلی معلق، پروتئین ها، چربی ها و کربوهیدرات ها پس از هیدورلیز شدن به اسیدهای چرب، آمینو اسیدها و قندها تبدیل می گردند. این مواد در مرحله اسیدی شدن و استات به جوهر نمک و سرکه تبدیل شده و در نهایت منجر به تولید بیوگاز متان می گردند که در سایر صنایع مختلف به عنوان سوخت قابل استفاده خواهند بود. از مهم ترین

ویژگی ها و دلایلی که باعث شده اند تصفیه فاضلاب به روش های بی هوازی با استقبال بیشتری نسبت به روش های لجن فعال و هوازی مواجه شوند، تولید لجن کمتر و مصرف انرژی و هزینه کم می باشد.

در رآکتورهای بی هوازی فاضلاب فاکتورها و عوامل گوناگونی می توانند بر روند تصفیه تاثیرگذار باشند. لذا لازم است مهم ترین فاکتورها که بر هضم بی هوازی فاضلاب تاثیرات منفی خواهند داشت و فرآیند تصفیه را با اختلال مواجه خواهند کرد به طور مرتب اندازه گیری و شناسایی نمود. از جمله این موارد می توان به گزینه های زیر اشاره کرد.(Li, Y., S. Y. Park, and J. Zhu.77 2011)

- PH فاضلاب
- دما: افزایش و کاهش دما بر فعالیت میکروارگانیسم ها تاثیرگذار است. لذا دما باید در حد مطلوبی (۳ تا ۴۰ درجه سانتیگراد) باشد
- مواد مغذی مورد نیاز برای انجام فعالیت های بیولوژیکی
- وجود مواد مهارکننده و سمی مانند سولفیدها که مانع از تصفیه مناسب می گردند

همان طور که اشاره شد، مواد آلی موجود در فاضلاب در روش های بی هوازی توسط میکروارگانیسم ها و باکتری ها انجام میشود که تفاوت زیادی با روش های هوازی دارد. تبدیل مواد آلی معلق در فاضلاب به گاز متان که خلاصه ای از فرآیند تصفیه با روش های بی هوازی می باشد، در سه مرحله مهم انجام می گردد که عبارتند از:

۴-۱-هیدرولیز (Hydrolysis)

مواد آلی موجود در فاضلاب های صنعتی و بهداشتی به شکل توده های به هم چسبیده می باشند که برای تبدیل شدن به منابع انرژی کربن سلولی لازم است تا حد زیادی جرم مولکولی آنها کاهش پیدا نموده و به قطعات کوچکتری تبدیل شود. به همین منظور اصلی ترین و اولین مرحله برای تصفیه فاضلاب به روش بی هوازی، مواد آلی با جرم ملوکولی بالا را به مواد محلول تبدیل می کند. به این عمل اصطلاحا هیدرولیز شدن گفته میشود که فرآیندی زمان بر است. در حالت عادی بازه زمانی ۵ تا ۱۰ روز و با توجه به نوع فاضلاب برای عمل هیدرولیز شدن فاضلاب زمان لازم است. پس از طی این مرحله، چربی ها، کربوهیدرات ها و روغن و پروتئین ها به مواد محلول در فاضلاب تبدیل خواهند شد. (Li, C., P. Champagne, and B. C. Anderson. 2011:52)

۴-۲-اسیدوژنز (اسید شدن)

دومین گام برای هضم بی هوازی فاضلاب، اسید شدن مواد آلی ساده شده در مرحله هیدرولیز می باشد. به عبارت دیگر، مولکول های چربی، روغن، کربوهیدرات ها و پروتئین ها به اسیدهای چرب، آمینو اسیدها و قندها تبدیل خواهند شد. لازم به ذکر است که مهم ترین فرآیند صورت گرفته در این گام، استات شدن مواد تولیدی می باشند که در نهایت منجر به تولید سرکه و جوهر نمک خواهد شد.

۴-۳-متانوژنز (تولید بیوگاز متان)

مهم ترین خروجی پکیج های تصفیه فاضلاب بی هوازی، علاوه بر فاضلاب زلال و بدون مواد آلی و لجن، گاز متان می باشد که در صنایع مختلف به عنوان سوخت مورد استفاده قرار میگیرد. این بیوگاز در آخرین مرحله فرآیند بی هوازی تصفیه تولید میشود که حاصل واکنش استات مرحله دو با H2 و CO2 خواهد بود. در این مرحله تا حد زیادی BOD کاهش پیدا خواهد کرد و تبدیل متان در رآکتورهای بی هوازی با توجه به مقدار PH و همچنین دما ممکن است تا ۵ ساعت زمان بر باشد. لازم به ذکر است که در برخی از نام گذاری ها به گام های هیدرولیز و اسیدوژنز اصطلاحا فاز ثابت BOD و به آخرین گام کاهش BOD نیز گفته می شود.

۵-تفاوت تصفیه بی هوازی و هوازی در تصفیه فاضلاب

با توجه به تعاریفی که برای روش های بی هوازی تصفیه فاضلاب معرفی گردید و مراحلی که مواد آلی در این فرآیند پشت سر می گذارند، می توان تفاوت های آن را با هوازی براحتی مشاهده نمود. از اصلی ترین تفاوت های این دو روش در تصفیه بیلوژیکی فاضلاب می توان به گزینه های زیر اشاره کرد.(Ge, X., F. Xu, and Y. Li. 2016:189)

- خروجی فرآیند بی هوازی تصفیه فاضلاب لجن، فاضلاب زلال و گاز متان می باشد، اما در هوازی گاز متان تولید نمیشود و هدر رفت حرارت در آن زیاد می باشد
- بهره برداری، نگهداری و تعمیر پکیج تصفیه فاضلاب بی هوازی نسبت به روش های هوازی نیاز به هزینه کمتری دارد
- لجن تولید شده در روش های بی هوازی کمتر از هوازی می باشد
- فرآیندهای لجن فعال و هوازی نسبت به بی هوازی انعطاف پذیری بالاتری در برابر دمای محیط دارند.
-

۶-انواع فرآیند بی هوازی در تصفیه فاضلاب

با توجه به مزایای بسیار زیاد فرآیند های بی هوازی برای تصفیه فاضلاب صنعتی و بهداشتی، روش های مختلفی بر اساس هضم بی هوازی فاضلاب معرفی شده اند که با توجه به نوع فاضلاب و شرایط تصفیه خانه مورد استفاده قرار می گیرند. رایج ترین انواع هضم بی هوازی فاضلاب عبارتند از:(Ferrer, I., S. Ponsa, F. Vazquez, and X. Font. 2008:192)

۶-۱-تصفیه بی هوازی با روش UASB

پکیج تصفیه فاضلاب UASB بر پایه استفاده از میکروب و میکروارگانیسم ها در شرایط بی هوازی عمل می کنند و در صنایع غذایی و داروسازی کاربرد گسترده ای دارند. در این پکیج فاضلاب، لایه های لجن لاگونی در انتهای مخزن منجر به واکنش مواد آلی در فاضلاب با میکروارگانیسم های لایه لجن می گردد. در نهایت این واکنش منجر به تولید گاز متان و دی اکسید

کربن خواهد شد. این پکیج شامل چند لایه مهم می باشد از قبیل لایه ورود فاضلاب به داخل دستگاه، لایه لجن با خاصیت گرانولی و قدرت چسبندگی بالا، لایه توده های انباشته از میکروارگانیسم ها که به پتوی لجن معروف است، لایه جداسازی مایع، گاز و جامد و شیرهای تخلیه فاضلاب و دودکش های تخلیه گاز متان. تصفیه بی هوازی فاضلاب با پکیج UASB به مواد غذایی لایه لجن به مدت طولانی نیاز ندارد و با توجه به بی هوازی بودن فرآیند تصفیه، بوی نامطلوب کمتری خواهد داشت.(Ferrer, I., S. Ponsa, F. Vazquez, and X. Font. 2008:99)

۶-۲-رآکتور تصفیه بی هوازیUAFB

تصفیه فاضلاب UAFB که به رآکتور تصفیه بی هوازی با رشد چسبیده نیز شناخته شده می باشد که فاضلاب به صورت ستونی به سمت بالای مخزن در مدول های لوله ای و پلاستیک های موج دار حرکت می باشد. این رآکتورهای بی هوازی UAFBدر اغلب مواقع از جنس پلاستیک ساخته میشوند و بخاطر تولید لجن کمتر و راندمان ۹۰ تا ۸۰ درصد برای حدف BODو COD در اغلب مواقع به عنوان پیش تصفیه فاضلاب های صنعتی مورد استفاده قرار میگیرند. از مهم ترین ویژگی های این روش تصفیه بی هوازی فاضلاب می توان به مقاومت بالا در برابر شوک های هیدرولیکی و آلی اشاره نمود.(Climent, M., I. Ferrer, M. del Mar Baeza, A. Artola, F. Vazquez, and X. Font. 2007:342)

۶-۳-رآکتور بافل دار بی هوازیABR

رآکتورهای بافل دار بی هوازی ABR به نوع خاصی از روش های تصفیه فاضلاب گفته میشود که فاضلاب ورودی به مخزن از اتاقک های متعدد حرکت بالا رونده و پایین رونده دارند. این شیوه حرکت و انتقال فاضلاب باعث میشود در برابر شوک هیدرولیکی و آلی مقاوم افزایش پیدا کند. عرض اتاقک های بالا رونده در این رآکتورها حدود سه برابر عرض اتاقک های پایین رونده بوده و در نهایت باعث میشوند دو فاز اسید شدن و تولید متان از هم جدا شوند. این روش تصفیه فاضلاب در تصفیه خانه های فاضلاب شهری با ظرفیت کوچک و پیش تصفیه واحدهای صنعتی و بزرگ مورد استفاده قرار میگیرد و راندمان بالایی برای فاضلاب های صنعتی دارند.

۶-۴-آکتور بی هوازی رشد ثابتFBR

رآکتورهای بی هوازی بستر سیال یا رشد ثابت FBR در دیگر نمونه های روش های تصفیه انواع فاضلاب می باشد که از ماسه، رزین آنیونی و کاتیونی و کربن فعال برای تصفیه استفاده می کند. این روش در اغلب مواقع برای تصفیه فاضلاب های صنعتی با COD بالا کاربرد دارد و کربن فعال مورد استفاده مقورن به صرفه نخواهد بود.

۷-واکنش گاه های مورد استفاده در هضم بی هوازی پسماندهای جامد آلی

زیست واکنشگاه (بیو- رآکتور) یا هاضم های مورد استفاده در هضم بی هوازی پسماندهای جامد آلی، بر چند اساس قابل طبقه بندی است: (۱) مقدار رطوبت موجود در خوراک (هضم مرطوب یا خشک)، (۲) روش خوراکدهی (خوراک دهی پیوسته[۵] تک‌مرحله‌ای، دومرحله ای و خوراک دهی ناپیوسته؛ (۳) دمای فرایند هضم (هضم گرمادوست[۶] یا

میانه‌دوست و (۴) تعداد فازهای موجود (تک‌فازی و دوفازی) (Chamchoi, N., H. Garcia, and I. Angelidaki. 2011:16)

۷-۱-هضم بی هوازی خشک و مرطوب

طبق تعریف، چنانچه غلظت کل جامدات موجود در خوراک کمتر از از ۱۵٪ باشد، فرایند از نوع تخمیر مرطوب است و اگر غلظت جامدات موجود در خوراک به ۴۰-۲۰ ٪ برسد، هضم بی هوازی از نوع خشک خواهد بود .در مواردی که درصد جامدات موجود در خوراک، بین دو محدودهٔ فوق قرار گیرد، هضم نیمه‌خشک نامیده می‌شود. در فرایند هضم بی هوازی مرطوب، باید با افزودن آب، ایجاد جریان چرخشی شیرابه و یا به کارگیری هضم بی هوازی ترکیبی، غلظت جامدات را در حد مطلوبی نگه‌داشت. بدین‌منظور عموماً از واکنشگاههای پیوسته کاملاً مخلوط دارای همزن های مکانیکی و یا ترکیبی از همزن و مجرای تزریق زیست گاز استفاده می شود. از مزایای فرایند هضم مرطوب می توان به رقیق سازی ترکیبات بازدارنده با افزودن آب و نیاز به تجهیزات مکانیکی ساده اشاره نمود؛ اما برخی از معایب این فرایند عبارت است از: پیچیدگی فرایند پیش تصفیه، مصرف زیاد آب و انرژی برای حرارت دهی و کاهش حجم مفید هاضم به‌دلیل ته‌نشین شدن مواد بی‌اثر. (Carrere, H., C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Batstone, J. P. Delgenes, J. P. Steyer, and I. Ferrer. 2010:15)

در اغلب واکنش گاه های مورد استفاده برای هضم بی هوازی خشک، از همزن های مکانیکی استفاده نمی‌شود و عموماً عمل اختلاط با تزریق زیست گاز صورت می گیرد. اما در این روش، محتویات هاضم به طور کامل مخلوط نمی شود؛ درنتیجه تماس کافی بین خوراک و ریزاندام ها برقرار نخواهد شد. بدین ترتیب، هاضم‌های مورد استفاده در هضم بی هوازی خشک را می توان از نوع واکنشگاه لوله ای۱ درنظر گرفت. اگرچه فرایند هضم بی هوازی خشک نیاز به مراحل پیش تصفیه پیچیده ندارد و نرخ بارگذاری آلی بیشتری به دست می دهد، اما این فرایند نیازمند تجهیزات مکانیکی پیچیده ای است و امکان رقیق سازی مواد بازدارنده در آن وجود ندارد[۵].[به طورکلی ظرفیت فرایند هضم بی هوازی خشک، نسبت‌به هضم بی هوازی مرطوب بیشتر است؛ اما مشاهده شده است که نیم رخ تولید زیست گاز در هر دو فرایند خشک و مرطوب یکسان می‌باشد.

۷-۲-هضم بی هوازی با سیستم خوراک دهی پیوسته و ناپیوسته

در سیستم های ناپیوسته، هاضم به یکباره با خوراک تازه پر می شود، سپس با بسته شدن محفظه و سپری شدن زمانی برابر با زمان اقامت واکنشگاه، محصولات هضم از درون واکنشگاه خارج می شوند. در سیستم های پیوسته، خوراک تازه به طور پیوسته وارد واکنشگاه می شود و به همان میزان، محصولات هضم نیز از واکنشگاه خارج می‌گردند:

در مقایسه با خاکچال ها، نرخ تولید زیست گاز در سیستم های ناپیوسته بیشتر است و این امر ناشی از دو ویژگی اساسی در چنین سیستم‌هایی می‌باشد: (۱) چرخش مداوم شیرابه علاوه بر پراکنده سازی مادهٔ تلقیحی ریزجاندار ها، مواد غذایی و اسیدهای تولیدی، باعث بهبود شرایط اختلاط نیز می‌گردد؛ (۲) دمای عملیاتی در سیستم‌های ناپیوسته معمولاً بیشتر از دمای خاکچال هاست. اگرچه سیستم های ناپیوسته سهم چشمگیری در بازار کشورهای توسعه یافته نداشته اند، اما به دلیل دارا بودن مزایایی چون بی‌نیازی از خرد کردن پسماند، بی نیازی از تجهیزات اختلاط و

همـزن هـای پیچیده و یا بی نیازی از مخازن گران قیمت و تحت‌فشار، دارای هزینه سرمایه گذاری کمی هستند؛ درنتیجه در کشورهای درحال توسعه بـه محبوبیت زیادی رسیده اند .اصلی ترین ایراد هاضم های ناپیوسـته تولیـد نایکنواخـت زیسـت‌گـاز و پایـداری کـم جمعیـت میکروبـی می‌باشد.

با توجه به اینکه فرایند هضم بی هوازی خود متشکل از چنـد فراینـد مجـزا از جملـه آبکافـت، اسیدسـازی و متـانسـازی مـی‌باشـد، سیستم های هضم پیوسته را می توان به سیستم های تـک‌مرحلـه‌ای و دو/چند مرحله ای طبقه بندی نمود. در سیسـتم هـای تـک مرحلـه ای پیوسته، تمام فرایند های زیست شیمیایی مذکور بـه طـور همزمـان و درون یک واکنشگاه رخ می دهند.گـروه هـای میکروبـی موجود در هریک از واکنش ها دارای نرخ رشد متفاوتی هستند و بـه شرایط بهینه ای از نظر دما و pH نیاز دارند؛ اما از آنجا که در فراینـد تک مرحله ای تمام واکنش ها باید در شرایط یکسانی رخ دهنـد، ایـن مسأله باعث می شود که در مقایسه بـا سیسـتم‌هـای چندمرحلـه‌ای، عملکرد سیستم های تک مرحله ای به راحتی دچـار اخـتلال شـود. در سیستم های دو/چند مرحله‌ای، با درنظر گـرفتن واکنشـگاه جداگانـه برای هریک از مراحل هضم می‌توان شرایط هضم را بهینه‌سازی نمود. یکی از معایـب عمـدۀ سیسـتم هـای هضـم بی هوازی دو/چند مرحله ای، کاهش بازدهی تولید زیست گاز است که ناشـی از حذف ذرات جامد از خوراک ورودی به مرحله دوم می باشد. بـه نظـر می رسد که سیستم های دو/چند مرحله ای بتوانند باعث افزایش نـرخ تبدیل مواد و استفاده از محدودۀ وسیع تری از مـواد زیسـتی شـوند؛ اما با وجود این برتری، کاربرد چنین سیستم هایی در صنعت محدود است؛ زیرا سیستم های تک مرحله ای دارای طراحی ساده تر، احتمـال خرابی کمتر و هزینه سرمایه گذاری کمتری می باشند. همچنـین، در صورتی که طراحی سیستم های تک مرحله ای به خـوبی انجـام شـود و شرایط عملیاتی آنها به‌دقت انتخاب گردد، عملکرد این واکنشگاهها برای اغلب پسماندهای آلی با عملکرد سیستم های دو/چند مرحله ای قابل‌مقایسه خواهد بود.(Carlsson, M., A. Lagerkvist, and F. Morgan-Sagastume. 2012:19)

۸-عوامل مؤثر بر هضم بی هوازی پسماند آلی جامد

۸-۱-دما

دما تعیین‌کنندۀ نرخ تجزیه بی هوازی، به‌ویـژه سـرعت واکـنش‌هـای آب کافت و متان سازی، می‌باشد. معمولاً فرایند هضم بی هوازی در دو محدودۀ دمایی بهینه رخ می دهد: دمای میانه دوست با بهینـه دمـای حدوداً ۳۵ °C و دمـای گرمادوسـت بـا بهینـه‌دمـای حـدوداً ۵۵ °C معمولاً دماهای پایین باعث کاهش رشـد میکروبـی، کاهش نرخ مصرف خوراک و نهایتاً کاهش تولید زیست‌گـاز خواهنـد شد. همچنین، دماهای پایین می توانند باعث کاهش انـرژی سـلولی، نشت مواد مغذی درون سلولی و یـا فسـاد کامـل سـلول گردنـد. از طرفی، در دماهای بالا با تولید گازهای فـراری نظیـر آمونیـاک، کـه باعث کاهش فعالیت متان سازی می گـردد، بـازده تولیـد زیسـت‌گـاز کاهش خواهدیافت. در سالهـای اخیـر، جهـت راهبـری هاضـم بی هوازی در فصول سرد (به‌ویـژه در کشـورهای کانـادا و آمریکـا) و کاهش هزینه‌های انرژی و گرمـایش، از هاضـم‌هـای سـایکروفیلیک به‌صورت واکنشگاه های ناپیوسته متـوالی اسـتفاده مـی‌کننـد. ایـن هاضم‌های ناپیوسته متوالی، عملکرد فراینـد بی هوازی را در دمـای پایین‌تر از ۳۵ درجه سلسیوس بهبود می‌بخشـند. راجاگوپـال و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای بر روی فرایند هضم بی هوازی ناپیوسته متوالی مخلوطی از پسماندهای خانگی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس (شـرایط سرمادوسـت) انجـام دادنـد کـه در ایـن شـرایط ۰/۴۷ متر مکعب گاز متان به ازای یک کیلوگرم مواد فرار تولید شـد و ایـن بـازده تولیـدی بـه

نتـــایج هاضـــم‌هـــای بی هوازی در شـــرایط گرمادوست و میانه‌دوست نزدیک است.(Bougrier, C., J. P. Delgenes, and H. Carrere. 2008:236)

۸-۲-رطوبت

معمولاً مقادیر زیاد رطوبت باعث تسهیل هضم بی هوازی خواهدشـد؛ البته ثابت نگه داشتن محتوای آب در یک چرخه هضم دشوار اسـت. محتوای زیاد آب باعث حل شدن مواد آلی تجزیه پـذیر مـی گـردد و بدین‌گونه بر عملکرد فرایند اثر خواهد گذاشت.

۸-۳-مواد مغذی

اصلی ترین مواد مغذی مورد نیاز برای باکتری های موجود در هاضـم عبارتند از: کربن (C)، هیدروژن (H_2)، اکسیژن (O_2) نیتـروژن (N_2)، فسفر (P) و گوگرد.(S) از بین تمام این مواد مغذی، N_2 و Pمعمولاً همواره به مقادیر کمی وجود دارند و به همین دلیـل بـرای برقـراری تعادل مناسبی از مواد مغذی، باید مواد خام غنی از نیتروژن و فسفر را به صورت مازاد به پسماندهای جامد افزود تـا بتـوان میـزان تولیـد زیست‌گاز را به حداکثر رساند.(Bougrier, C., C. Albasi, J. P. Delgenès, and H. Carrere. 2006:711)

۸-۴-زمان اقامت هیدرولیکی

زمان ماند هیدرولیکی نشان دهندۀ زمان متوسـط اقامـت یـک مـادۀ خاص در هاضم می باشد. در یک هاضم پیوسته، محتویات واکنشـگاه دارای زمان ماند نسبتاً یکنواختی است. در چنین سیستمی، حـداقل زمان ماند توسط نرخ رشد ریزاندام های ضروری دارای آهسـته تـرین میزان رشد تعیین می گردد چنانچه مقدار زمـان مانـد کمتر از این میزان حداقل باشد، ریزاندام هایی با نـرخ رشـد آهسـته (متانسازها) از سیستم خارج شده و درنتیجه عملکرد سیستم دچاراختلال خواهدشد. از طرفی، کاهش زمان ماند باعـث کـاهش انـدازۀ هاضم می شـود و از نظـر اقتصـادی مقـرون بـه صـرفه تـر خواهـدبود. همچنین زمان ماند کوتاه تر، سبب افزایش بازدهی تولید زیسـت گـاز می گردد، اما تجزیه مواد آلی (مانند جامدات فرار) با کارایی کمتـری صورت گرفته، می تواند منجربه ناپایداری فرایند شود. طبق مطالعـات انجام گرفته باتوجه بـه نـوع خـوراک، تعـداد مراحـل فراینـد، دمـای عملیاتی و شـکل واکنشـگاه، زمـان مانـد هیـدرولیکی مـی‌توانـد در محدودۀ ۵ تا ۵۵ روز متغیر باشد.(Appels, L., J. Degreve, B. Van der Bruggen, J. Van Impe, and R. Dewil. 2010:101)

۸-۵-مقدار بارگذاری مواد آلی

مقدار بارگذاری مواد آلی عبارت است از مقدار مواد آلی (بـه صـورت جامدات فرار و یا اکسیژن شیمیایی موردنیاز خوراک) کـه بایسـتی توسط حجم معینی از هاضم بی هوازی و در مدت زمان معینی مـورد فرآوری قرارگیرد. یکی از خطرات احتمالی افزایش مقـدار بارگـذاری آلی این است که باکتری های آب کافت کننده و اسیدسـاز بـه سـرعت فعالیت بـاکتری هـای متانساز شده، درنهایت منجربه توقف سیستم می‌گردد.(Angelidaki, I., M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, and J. B. Van Lier. 2009:808)

۸-۶- شرایط اختلاط

اختلاط باعث افزایش تماس بین خوراک تازۀ ورودی و جمعیت میکروبی و نیز مانع از توزیع نامناسب دما و تجمع لایه سطحی[۶] در هاضم بی هوازی می‌شود. همچنین، با انجام اختلاط مناسب می‌توان اطمینان حاصل نمود که جامدات در فاز آویزش (سوسپانسیون) باقی می مانند و فضای مرده ای در واکنشگاه ایجاد نخواهد شد. تحقیقات نشان دادهاست که اختلاط آهسته منجربه عملکرد عالی در هضم ذرات جامد پسماندهای شهری می شود و نرخ تولید گاز را افزایش می دهد. اما اختلاط پیوسته و شدید می تواند در مقادیر بارگذاری آلی زیاد به عنوان یک عامل بازدارنده عمل کند؛ زیرا باعث اختلال در روابط متقابل و جایگیری فضایی مواد و ریزجاندار ها در کنار یکدیگر خواهدشد. عمل اختلاط در هاضم های بی هوازی با استفاده از روش های متعددی از جمله استفاده از همزنهای مکانیکی، بازگردانی دوغاب (لجن هاضم) و یا تزریق زیست گاز تولید شده، امکانپذیر است.(Angelidaki, I., M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, and J. B. Van Lier. 2009:927)

۸-۷-مواد بازدارنده

مواد بازدارندۀ عمل هضم بی هوازی می توانند به صورت 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:

۸-۷-۱-آمونیاک

آمونیاک یکی از محصولات آبکافت است که در حین هضم بی هوازی، از طریق تجزیه مواد نیتروژنی موجود در پروتئین‌ها، فسفولیپیدها، لیپیدهای نیتروژنی و نوکلئیک‌اسیدها ایجاد می‌گردد. در یک محلول، آمونیوم می تواند به شکل یون آمونیوم یا آمونیاک آزاد وجود داشته باشد. طبق گزارش های موجود، آمونیاک آزاد دارای اثر بازدارندگی شدیدتری است؛ زیرا می‌تواند به‌راحتی از غشاء عبور و به درون سلول ها نفوذ نماید و بدین ترتیب باعث بر هم خوردن تعادل پروتونی و/یا کمبود پتاسیم گردد.(Ariunbaatar, J., A. Panico, G. Esposito, F. Pirozzi, and P. N. Lens. 2014:143)

۸-۷-۲-سولفید

تشکیل هیدروژن سولفید در هضم بی هوازی، ناشی از فرایند کاهش ترکیبات سولفوری اکسید شده و لخته شدن آمینواسیدهای حاوی سولفور توسط باکتری های کاهندۀ سولفات[۱] است. بازدارندگی ناشی از فرایند کاهش سولفات را می‌توان به دو مرحله تفکیک کرد؛ بازداری اولیه از طریق کاهش تولید متان در اثر رقابت باکتری‌های کاهندۀ سولفات با باکتری های متان ساز، برای تأمین مواد مغذی آلی و غیرآلی تعیین می‌شود. بازداری ثانویه در اثر سمیت سولفید برای بسیاری از گروههای باکتری‌های بی هوازی ایجاد می‌شود.(Barjenbruch, M., and O. Kopplow. 2003:719)

۸-۷-۳-مواد آلی

تجمع مواد آلاینده آلی آب گریز در غشاهای باکتریایی باعث ایجاد تورم و نشتی غشا، اختلال در گرادیان غلظت‌های یونی و نهایتاً شکسته شدن غشاهای سلولی خواهدشد. برخی از مواد آلی مهم که دارای اثر بازدارندگی برای فرایند هضم بی هوازی می باشند، عبارتند از: کلروفنول ها، آلیفاتیک های هالوژن دار، آروماتیک های دارای جایگزین نیتروژنی، اسیدهای چرب دراز زنجیر و لیگنین و مشتقات آن.

۸-۷-۴-فلزات سنگین و کاتیونها

همانطور که باکتری‌های بی هوازی 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 باکترهای بی هوازی دارد. غلظت مورد نیاز و بازدارندهٔ فلزات سنگین و کاتیونها جهت فعالیت ریزاندامهای بی هوازی آورده شدهاست. فلزات سنگین زیست‌تخریب‌ناپذیر هستند و با تجمع یافتن در محیط بی هوازی ساختار و عملکرد زیمایه‌ها را تخریب و فعالیت ریزاندامهای بی هوازی را متوقف می‌کنند.(Bien, J. B., G. Malina, J. D. Bien, and L. Wolny. 2004:98)

نتیجه گیری

در این مقاله، هضم بی هوازی به عنوان یکی از مؤثرترین فرایندهای زیست شناسانه به منظور تصفیه محدودهٔ وسیعی از پسماندهای جامد آلی و لجن و فاضلاب معرفی شد. فرآیند تصفیه بی هوازی فاضلاب همان طور که از نامش مشخص است، به مجموعه فرآیندهای بیولوژیکی برای تصفیه فاضلاب صنعتی و بهداشتی گفته میشود که بدون حضور اکسیژن صورت می گیرد. روش های هضم بی هوازی فاضلاب مانند روش های هوازی با کمک باکتری و میکروارگانیسم ها صورت می گیرد، با این تفاوت که عمل تجزیه مواد آلی در این روش بدون استفاده از اکسیژن انجام خواهد شد. مشکلات زیادی در آبگیری لجن فاضلاب وجود دارد که اولین گام برای بهبود عملکرد بیوگاز، کاهش حجم لجن فاضالب می باشد.بخش عمده تشکیل دهنده لجن بیولوژیکی میکروارگانیسم ها هستند که دارای سلول، آب درون سلولی و غشا می باشند. از آنجایی که هدف اصلی از آبگیری از لجن، خارج کردن آب درون سلولها می باشد، روش مورد استفاده باید توانایی شکستن غشای سلولی و آزاد کردن آب درون سلولی را داشته باشد. فاضلاب که از مخلوط صنعتی و خانگی جمع آوری می شود ممکن است به فلزات و مواد شیمیایی صنعتی آلوده شود که با حذف این فلزات از لجن فاضالب میتوان باعث کاهش قابل توجهی در تولید بیوگاز و حذف مواد آلی فرار شد .امروزه در سراسر جهان روشهای مختلفی برای آبگیری از لجن فاضلاب وجود دارد که میتوان به روشهای زیر اشاره کرد. این روشها به عنوان پیش تیمار برای کاهش حجم لجن وجود دارد. از مهم ترین مزایای فرآیندهای بی هوازی در تصفیه فاضلاب می توان به موارد زیر اشاره نمود:

عدم نیاز به تجهیزات مکانیکی برای هوادهی فاضلاب از قبیل هواده سطحی شناور و ثابت و هواده عمقی

نیاز به فضای کمتر برای نصب و راه اندازی پکیج تصفیه

تولید لجن کمتر نسبت به سایر روش های هوازی

تولید بیوگازها و مصرف متان تولیدی در سایر صنایع به عنوان سوخت

مصرف انرژی کم

عدم نیاز به تغذیه منظم و دوره ای به منظور زنده نگهداشتن لجن برخلاف روش های هوازی
راندمان بالا در حذف BOD و COD در فاضلاب های صنعتی و بهداشتی
مقاومت بالا در برابر شوک آلی و هیدورلیکی افزایش جمعیت روبه‌رو شد شهرها، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و تغییر الگوی رایج مصرف شهروندان به استفاده از کالاها و محصولات گوناگون خصوصاً از طریق تبلیغات در رسانه‌های گروهی به تولید مواد زائد (پسماندها) متنوع حاصل از فعالیت‌های بشری افزایش چشمگیری داده است. در گذشته به‌علت نا شناخته بودن تأثیر پسماندها (زباله) بر محیط‌زیست اهمیت چندانی به آن داده نمی‌شد، در عین‌حال نبود تکنولوژی مناسب، فقدان منابع مالی و نیروی انسانی کارآمد مانع اصلی در برابر مدیریت مناسب پسماندهای شهری می‌شد. اما امروزه هم مردم و هم مدیران شهری آگاهی مطلوبی از زباله و چگونگی مدیریت بر آن داشته و می‌دانند که زباله صرفاً نباید دفن یا سوزانده شود و می‌توان با بازیافت آن هم بر تخریب و آسیب رساندن بر محیط‌زیست جلوگیری کرد و هم یک منبع درآمد و چرخشی اقتصادی مناسب حاصل از این اقدام بدست آورد. از طرف دیگر وجود مسائلی نظیر محدودیت‌ها و کمبود زمین برای دفن مواد زائد جامد (پسماندها) درشهرهای کشورمان مانند شهرهای شمالی و خصوصاً در کلان شهری نظیرتهران و یا عدم توانائی و عملی نبودن سوزاندان انواع پسماندهای غیرقابل دفن اصولاًدر بیشتر موارد عامل اصلی باز دارنده در هر نوع حرکتی درمدیریت پسماندهای جامد شهری می‌تواند باشد، بنابراین مسأله جمع‌آوری و دفن غیر اصولی زباله که به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی منجر شده و همچنین محیط‌زیست و زندگی انسان‌ها را به مخاطره می‌اندازد می‌بایست توجه و عنایت ویژه‌ای شده و در مورد مواد زائد جامد و مدیریت پسماندها با تعمق بیشتر و با ارایه راهکار مورد توجه قرارگیرد. علی رغم برخی از پیچیدگی های فرایند هضم بی هوازی و طولانی بودن مدت زمان انجام این فرایند، هضم بی هوازی پسماندهای جامد مزایای بسیاری - از جمله انتشار کمتر آلاینده ها در حین هضم، تولید همزمان زیست گاز به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر و مواد هضم شدهٔ قابل استفاده به‌عنوان کمپوست اصلاح کنندهٔ خاک، مدیریت پسماندهای جامد آلی و کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از تجمع آن ها - خواهد داشت. به منظور بهبود سرعت فرایند هضم بی هوازی، افزایش کارکرد و کیفیت تولید زیست گاز، راهکارهای مختلفی از جمله روشهای پیش‌تصفیه مختلف و سیستم های واکنشگاه مناسب مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ اما به طورکلی، روش پیش تصفیه گرمایی به‌همراه افزودن مواد قلیایی سیستم های واکنشگاه دو/چندمرحله ای پیوسته، در صنعت کاربرد بیشتری یافته اند. علاوه براین، یکی دیگر از عواملی که باعث بهبود یا اختلال در فرایند هضم بی هوازی می گردد، تغییرات شرایط عملیاتی ترکیب خوراک (دما، pH، رطوبت، نسبت کربن/نیتروژن و دیگر شرایط و ترکیب) است. بازیابی انرژی از هضم بی هوازی به شکل تولید زیست گاز صورت می پذیرد. این محصول به‌عنوان یک منبع انرژی ارزان قیمت و تجدید پذیر، در مصارفی نظیر گرمایش، تولید برق، تبدیل به سوخت وسایل نقلیه و موارد دیگر مصرف می شود. علاوه براین، می توان از جریان مواد هضم شدهٔ خروجی از هاضم بی هوازی نیز به عنوان یک کود مناسب جهت مصارف کشاورزی، باغبانی و اصلاح خاک استفاده نمود.

منابع

1. Aboudi, K., C. J. Alvarez-Gallego, and L. I. Romero-García. 2017. Influence of total solids concentration on the anaerobic co-digestion of sugar beet by-products and livestock manures. Science of the Total Environment 586: 438-445. DOI: 1016/j.scitotenv.2017.01.178.
2. American Public Health Association (APHA). Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. Washington DC (USA): American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.
3. Angelidaki, I., M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, and J. B. Van Lier. 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. Water Science and Technology 59 (5): 927-934. DOI: 2166/wst.2009.040.
4. Appels, L., J. Degreve, B. Van der Bruggen, J. Van Impe, and R. Dewil. 2010. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. Bioresource Technology 101 (15): 5743-5748. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.068.
5. Ariunbaatar, J., A. Panico, G. Esposito, F. Pirozzi, and P. N. Lens. 2014. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. Applied Energy 123: 143-156. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.035.
6. Barjenbruch, M., and O. Kopplow. 2003. Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge. Advances in Environmental Research 7 (3): 715-720. https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00032-1.
7. Bien, J. B., G. Malina, J. D. Bien, and L. Wolny. 2004. Enhancing anaerobic fermentation of sewage sludge for increasing biogas generation. Journal of Environmental Science and Health Part A 39 (4): 939-949. DOI: 1081/ese-120028404.
8. Bougrier, C., C. Albasi, J. P. Delgenès, and H. Carrere. 2006. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 45 (8): 711-718. https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.02.005.
9. Bougrier, C., J. P. Delgenes, and H. Carrere. 2008. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. Chemical Engineering Journal 139 (2): 236-244. https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.07.099.
10. Carlsson, M., A. Lagerkvist, and F. Morgan-Sagastume. 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. Waste Management 32 (9): 1634-1650. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.016.
11. Carrere, H., C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Batstone, J. P. Delgenes, J. P. Steyer, and I. Ferrer. 2010. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. Journal of Hazardous Materials 183 (1-3): 1-15. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129.

12. Chamchoi, N., H. Garcia, and I. Angelidaki. 2011. Methane potential of household waste; Batch assays determination. Applied Environmental Research 33 (1): 13-26.
13. Climent, M., I. Ferrer, M. del Mar Baeza, A. Artola, F. Vazquez, and X. Font. 2007. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. Chemical Engineering Journal 133 (1-3): 335-342. https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.02.020.
14. Edelmann, W., U. Baier, and H. Engeli, 2005. Environmental aspects of the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes and of solid agricultural wastes. Water Science and Technology 52 (1-2): 203-208.
15. Elliot, A., and T. Mahmood. 2012. Comparison of mechanical pretreatment methods for the enhancement of anaerobic digestion of pulp and paper waste. Water Science Technology 84: 497-505. DOI: 2175/106143012x13347678384602.
16. Fernandez, J., M. Perez, and L. I. Romero. 2008. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). Bioresource Technology 99 (14): 6075-6080. DOI: 1016/j.biortech.2007.12.048.
17. Ferrer, I., S. Ponsa, F. Vazquez, and X. Font. 2008. Increasing biogas production by thermal (70) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. Biochemical Engineering Journal 42 (2): 186-192. DOI: 1016/j.bej.2008.06.020.
18. Ge, X., F. Xu, and Y. Li. 2016. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. Bioresource Technology 205: 239-249. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.050.
19. Li, C., P. Champagne, and B. C. Anderson. 2011. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. Bioresource Technology 102 (20): 9471-9480. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.103.
20. Li, Y., S. Y. Park, and J. Zhu. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (1): 821-826. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042.
21. J. Li, H. Li, and Z. Yu. 2016. Effects of thermal pretreatment on the biomethane yield and hydrolysis rate of kitchen waste. Applied Energy 172: 47-58. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.080.
22. Liu, G., R. Zhang, H. M. El-Mashad, and R. Dong. 2009. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. Bioresource Technology 100 (21): 5103-5108. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.081.
23. Liu, X., W. Wang, X. Gao, Y. Zhou, and R. Shen. 2012. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste. Waste Management 32 (2): 249-255. DOI: 1016/j.wasman.2011.09.027.
24. Maghanaki, M. M., B. Ghobadian, G. Najafi, and R. J. Galogah. 2013. Potential of biogas production in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews 28: 702-714. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.021.

25. Marin, J., K. J. Kennedy, and C. Eskicioglu. 2010. Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste. Waste Management 30 (10): 1772-1779. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.033.
26. McLeod, J. D., M. Z. Othman, D. J. Beale, and D. Joshi. 2015. The use of laboratory scale reactors to predict sensitivity to changes in operating conditions for full-scale anaerobic digestion treating municipal sewage sludge. Bioresource Technology 189: 384-390. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.049.
27. Mirmasoumi, S., R. K. Saray, and S. Ebrahimi. 2018. Evaluation of thermal pretreatment and digestion temperature rise in a biogas fueled combined cooling, heat, and power system using exergo-economic analysis. Energy Conversion and Management 163: 219-238. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.069.
28. Mottet, A., J. P. Steyer, S. Deleris, F. Vedrenne, J. Chauzy, and H. Carrere. 2009. Kinetics of thermophilic batch anaerobic digestion of thermal hydrolysed waste activated sludge. Biochemical Engineering Journal 46 (2): 169-175. https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.05.003.
29. Neyens, E., and J. Baeyens. 2003. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. Journal of Hazardous Materials 98 (1-3): 51-67. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00320-5.
30. Panda, S., and N. P. Padhy. 2008. Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS_based controller design. Applied Soft Computing 8 (4): 1418-1427. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.10.009.
31. Pavan, P., P. Battistoni, J. Mata-Alvarez, and F. Cecchi. 2000. Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. Water Science and Technology 41 (3): 75-81.
32. Penaud, V., J. P. Delgenes, and R. Moletta. 1999. Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: Influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability. Enzyme and Microbial Technology 25 (3-5): 258-263. https://doi.org/10.1016/S0141-0229(99)00037-X.
33. Prorot, A., L. Julien, D. Christophe, and L. Patrick. 2011. Sludge disintegration during heat treatment at low temperature: A better understanding of involved mechanisms with a multiparametric approach. Biochemical Engineering Journal 54 (3): 178-184. https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.02.016.
34. Rafique, R., T. G. Poulsen, A. S. Nizami, J. D. Murphy, and G. Kiely. 2010. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. Energy 35 (12): 4556-4561. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.011.
35. Raposo, F., M. A. De la Rubia, V. Fernandez-Cegri, and R. Borja. 2012. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (1): 861-877. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008.
36. Skiadas, I. V., H. N. Gavala, J. Lu, and B. K. Ahring. 2005. Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70 prior to anaerobic digestion. Water Science and Technology 52 (1-2): 161-166.
37. Roshani, A., Shayegan, J., Babaee, A., “Methane production from anaerobic co-digestion

of poultry manure", Journal of Environmental Studies, 38(62), 22-24, (2012).
38. 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
39. 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).
40. 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).
41. De Baere, L., "Anaerobic digestion of solid waste: state of the art", Water Science and Technology, 41(3), 283-290, (2000).
42. 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).
43. 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