پژوهشگاه نیرو

مبانی فن‌آوری هضم بی‌هوازی







مدیر پروژه: مهدی رضایی

واحد مجری: گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

NRI-ER-1003-PNEPN32-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.278


بسم الله الرحمن الرحيم

مبانی فن‌آوری هضم بی‌هوازی

مدیر پروژه: مهدی رضایی
گروه پژوهشی پشتیبان: گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

همکاران پروژه: احسان لیوانی، شهریار بزرگمهری، مهسا صدیقی، الناز ملکی قلیچی

واحد مجری: گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

انتشارات پژوهشگاه نیرو
دی‌ماه ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: NRI-ER-1003-PNEPN32-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.278

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

مبانی فن‌آوری هضم بی‌هوازی/مدیر پروژه: رضائی، مهدی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۲۲۱ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. بزرگمهری، شهریار؛ لیوانی، احسان؛ ملکی قلیچی، الناز، همکاران پروژه. ۲. لاری، حمیدرضا، مدیر واحد مجری. ۳. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر. ۴. محور پژوهشی انرژی زیست‌توده

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

پیشگفتار

تبدیل پسماند به انرژی (Waste-to-Energy) یکی از ارکان مدیریت پسماند در دنیای امروز محسوب می‌شود. امروزه در هرم مدیریت پسماند در کنار سه رکن اصلی که به اختصار 3R نامیده می‌شود، یعنی کاهش تولید پسماند (Reduction)، استفاده مجدد (Reuse) و بازیافت (Recycle) که همگی مبتنی بر مفاهیمی مانند توسعه پایدار، اقتصاد چرخشی و به حداقل رساندن اثرات مخرب محیط زیستی می‌باشند، موضوع دفن حداقلی پسماند در زمین (Landfilling) باعث شده تا مفهوم بازیافت انرژی از پسماند (Recovery) و به حداقل رساندن زباله قابل دفن از اهمیت دو چندانی برخوردار شود.

در مقوله تبدیل پسماند به انرژی (WTE)، فن‌آوری‌های مختلفی وجود دارد که برخی از آنها تجاری شده و سالیان متمادی است که در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه، مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. متأسفانه بعضاً دیده می‌شود در کشورهایی از جمله ایران که قصد ورود به مقوله WTE را دارند، افراط و تفریط هایی در انتخاب فن‌آوری صورت می‌گیرد که نتیجه آن بعضاً اجرای پروژه‌هایی است که به واسطه عدم آمادگی کشور (فنی، اقتصادی، قانونی، اجتماعی، زیرساختی و ...) به سرانجام مطلوب نرسیده و ذهنیت جامعه را نسبت به این نوع فن‌آوری‌ها مخدوش می‌نماید.

با توجه به سابقه فعالیت‌های پژوهشگاه نیرو در عرضه فن‌آوری‌های مختلف WTE و مطالعات انجام شده ذیل سند توسعه فن‌آوری‌های انرژی زیست‌توده، فن‌آوری‌های اولویت‌دار کشور در مقوله WTE شناسایی شده است و طرح انرژی زیست‌توده پژوهشگاه نیرو قصد دارد با مشارکت کلیه ذینفعان و بسیج منابع موجود در این حوزه، اقدام به توسعه فضای کسب و کار و بومی‌سازی حداکثری این فن‌آوری‌ها در کشور نماید.

این گزارش توسط طرح انرژی زیست‌توده پژوهشگاه نیرو با هدف انتخاب فن‌آوری مناسب از میان فن‌آوری‌های هضم بی‌هوازی برای تبدیل بخش فسادپذیر پسماند شهری به برق و انرژی تهیه شده است.

در تهیه این گزارش، همکاران زیر از بخش‌های مختلف همکاری داشته‌اند:

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت	محل خدمت
۱	مهدی رضایی	مدیر پروژه	پژوهشگاه نیرو
۲	الناز ملکی قلیچی	همکار پروژه	پژوهشگاه نیرو
۳	مهسا صدیقی	ناظر داخلی پروژه	پژوهشگاه نیرو

فهرست مطالب

پیشگفتار ..... أ
فهرست مطالب ..... ج
فهرست شکل‌ها ..... ط
فهرست جداول ..... ک
مقدمه ..... م
۱– فصل اول : انواع نیروگاه WTE ۱
۱–۱– مقدمه ۲
۱–۲– زیست‌توده ۲
۱–۳– انرژی زیستی ۲
۱–۴– فن‌آوری‌های تولید انرژی از پسماند ۳
۱–۵– نتیجه‌گیری ۵
۲– فصل دوم : مبانی فن‌آوری هضم بی‌هوازی ۶
۲–۱– مقدمه ۷
۲–۲– بیوگاز ۷
۲–۳– منابع اصلی زیست‌توده برای تولید بیوگاز ۹
۲–۴– معرفی فرایند هضم بی‌هوازی ۱۰
۲–۵– تقسیم‌بندی انواع هاضم بی‌هوازی ۱۰
۳– فصل سوم : فن‌آوری هضم بی‌هوازی مناسب برای زباله شهری ۱۳
۳–۱– مقدمه ۱۴
۳–۲– پسماندهای شهری ۱۴
۳–۳– هاضم پسماند شهری ۱۵
۳–۴– الزامات انتخاب فن‌آوری هضم بی‌هوازی ۱۶
۳–۵– نتیجه‌گیری ۱۸
۴– فصل چهارم : فن‌آوری هضم بی‌هوازی مناسب برای فضولات دامی ۲۱
۴–۱– مقدمه ۲۲
۴–۲– فضولات دامی ۲۲
۴–۳– پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی در ایران ۲۳
۴–۴– جمع‌آوری فضولات دامی ۲۴

۵-۴- هضم بی‌هوازی کود دامی ۲۵
مراجع ۲۸
۵- فصل پنجم : مطالعات کتابخانه‌ای ۳۱
۵-۱- مقدمه ۳۲
۵-۲- تجزیه زیستی ۳۲
۵-۳- هضم بی‌هوازی ۳۳
۵-۳-۱- مراحل و واکنش‌ها ۳۳
۵-۴- پارامترهای مؤثر بر عملکرد هاضم ۳۳
۵-۴-۱- دما ۳۳
۵-۴-۲- pH ۳۴
۵-۴-۳- نسبت مواد مغذی C/N/P ۳۵
۵-۴-۴- فشار ۳۵
۵-۴-۵- زمان ماند هیدرولیکی (HRT) ۳۵
۵-۴-۶- میزان بارگیری مواد فسادپذیر (OLR) ۳۶
۵-۴-۷- قلیائیت ۳۶
۵-۴-۸- غلظت میکروارگانیسم‌ها ۳۶
۵-۴-۹- عناصر کم‌مقدار ۳۶
۵-۴-۱۰- آمونیاک ۳۷
۵-۴-۱۱- نتیجه‌گیری پارامترهای مؤثر ۳۷
۵-۵- بیوگاز ۳۸
۵-۵-۱- کاربردها ۳۹
۵-۵-۲- مزایا ۳۹
۵-۶- ترکیب درصد پسماند ۳۹
۵-۶-۱- پسماند شهری (آشپزخانه‌ای) ۳۹
۵-۶-۲- فضولات دامی گاو ۴۰
۵-۷- رآکتورهای مناسب برای هضم بی‌هوازی ۴۰
۵-۷-۱- ساختار راکتورها ۴۲
۵-۷-۲- محتوای جامد ۴۲
۵-۷-۳- تعداد مراحل ۴۳
۶- فصل ششم : مدل‌سازی فرایند هضم بی‌هوازی ۴۴
۶-۱- مقدمه ۴۵
۶-۲- فرایندهای بیوشیمیایی ۴۵
۶-۳- فرایندهای فیزیکی-شیمیایی ۴۶

۴-۶- مدل ADM1 ..... ۴۷
۵-۶- توسعه مدل ADM1 ..... ۴۸
۱-۵-۶- مدل ADM1 همراه با مسیر اکسیداسیون استات ۴۸
۶-۶- اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته ADM1 ..... ۵۰
۱-۶-۶- مشخصات خوراک و شرایط اولیه ۵۱
۲-۶-۶- نتایج اعتبارسنجی ۵۳
۷- فصل هفتم : فرآیندهای پیش‌تصفیه و ارتقا بیوگاز ۵۸
۱-۷- پیش‌تصفیه ۵۹
۲-۷- موارد استفاده از بیوگاز و روش‌های ارتقا بیوگاز ۶۰
۳-۷- ارتقا بیوگاز ۶۰
۸- فصل هشتم : امکان‌سنجی فنی و تخمین هزینه‌های ساخت و راهبری ۶۳
۱-۸- اجزاء واحد تولید بیوگاز ۶۴
۲-۸- واحد پیش‌تصفیه بر اساس خوراک پسماند شهری ۶۵
۱-۲-۸- واحد دریافت خوراک ۶۵
۲-۲-۸- ذخیره‌سازی خوراک ۶۶
۳-۲-۸- آماده‌سازی خوراک ۶۶
۴-۲-۸- سیستم خوراک‌دهی ۶۶
۳-۸- واحد پیش‌تصفیه بر اساس خوراک فضولات دامی ۶۷
۱-۳-۸- واحد حذف شن و ماسه ۶۸
۲-۳-۸- ذخیره‌سازی خوراک ۶۸
۳-۳-۸- له کردن، همگن‌سازی ۶۸
۴-۳-۸- سیستم خوراک‌دهی ۶۹
۴-۸- واحد هاضم ۷۰
۱-۴-۸- هاضم جریان قالبی (خوراک پسماند شهری) ۷۲
۲-۴-۸- هاضم اختلاط کامل (خوراک فضولات دامی) ۷۳
۵-۸- واحد مدیریت مواد هضم‌شده ۷۴
۶-۸- واحد تصفیه بیوگاز ۷۶
۷-۸- واحد تولید هم‌زمان برق و گرما (CHP) ۷۹
۸-۸- واحد فلر ۸۱
۹-۸- واحد کنترل ۸۱
۱۰-۸- برنامه‌ریزی و ساخت نیروگاه بیوگاز ۸۲
۱۱-۸- جمع‌بندی ۸۵
مراجع ۸۸

۹– فصل اول : معرفی نیروگاه بیوگاز ۹۴
۹–۱– مقدمه ۹۵
۹–۲– پیش‌بینی سهم انرژی زیستی در سبد انرژی دنیا ۹۵
۹–۳– وضعیت انرژی زیست‌توده در ایران ۹۹
۹–۴– معرفی نیروگاه بیوگاز ۱۰۲
۱۰– فصل دهم : ملاحظات فنی احداث نیروگاه بیوگاز ۱۰۶
۱۰–۱– مقدمه ۱۰۷
۱۰–۲– تدوین کردن مفهوم و طرح کلی پروژه ۱۰۸
۱۰–۳– مطالعات امکان‌سنجی ۱۱۰
۱۰–۴– مساحت مورد نیاز جهت احداث نیروگاه بیوگاز ۱۱۲
۱۰–۵– ظرفیت قابل نصب ۱۱۳
۱۰–۶– مدت زمان احداث ۱۱۳
۱۰–۷– توان قابل استحصال نیروگاه هضم بی‌هوازی ۱۱۳
۱۰–۸– عمر مفید نیروگاه ۱۱۴
۱۰–۹– جریان مواد و انرژی در نیروگاه بیوگاز ۱۱۵
۱۰–۱۰– کاربردهای بیوگاز ۱۱۶
۱۰–۱۱– استانداردهای نیروگاه‌های زیست‌توده ۱۲۱
مراجع ۱۲۲
۱۱– فصل یازدهم : مقدمه ۱۲۹
۱۱–۱– مقدمه ۱۳۰
۱۱–۲– هدف کلان ۱۳۲
۱۱–۳– اهداف خرد ۱۳۲
۱۱–۴– محدوده کاربرد ۱۳۳
۱۲– فصل دوازدهم : قوانین، مصوبات و استانداردها ۱۳۴
۱۲–۱– مقدمه ۱۳۵
۱۲–۲– قوانین، مصوبات و استانداردها ۱۳۵
۱۳– فصل سیزدهم : ملاحظات برنامه‌ریزی و انتخاب سایت ۱۳۷
۱۳–۱– مقدمه ۱۳۸
۱۳–۲– حریم و منطقه حائل ۱۳۸
۱۳–۳– نزدیکی به منابع اولیه و بازارهای نهایی محصول ۱۴۱
۱۳–۴– انطباق با کاربری‌های همجوار ۱۴۱
۱۳–۵– انطباق با سیاستگذاری‌ها در بخش کاربری اراضی ۱۴۲
۱۳–۶– امکان توسعه سایت ۱۴۳

۱۳-۷- ملاحظات ترافیکی ۱۴۳
۱۳-۸- دسترسی به امکانات و خدمات شهری ۱۴۴
۱۳-۹- سایر ملاحظات محیط زیستی ۱۴۵
۱۴- فصل چهاردهم : طراحی سایت و ملاحظات بهره‌برداری ۱۴۶
۱۴-۱- مقدمه ۱۴۷
۱۴-۲- اطلاعات مورد نیاز برای طراحی مقدماتی ۱۵۰
۱۴-۲-۱- طراحی مقدماتی برای مدیریت خوراک ۱۵۳
۱۴-۳- مؤلفه‌های اصلی طراحی تأسیسات هضم بیهوازی ۱۵۶
۱۵- فصل پانزدهم : راه‌اندازی و آغاز به کار تأسیسات هضم بیهوازی ۱۶۶
۱۵-۱- مقدمه ۱۶۷
۱۶- فصل شانزدهم : بهره‌برداری از تأسیسات هضم بیهوازی ۱۶۹
۱۶-۱- مقدمه ۱۷۰
۱۶-۲- ملاحظات کارکردی نیروگاه هضم بیهوازی ۱۷۰
۱۶-۳- مدیریت و پساپردازش مواد هضم‌شده ۱۷۰
۱۶-۴- استفاده از بیوگاز ۱۷۰
۱۶-۵- مدیریت مواد باقیمانده غیرآلی ۱۷۲
۱۶-۶- پیشگیری از موقعیت‌های اضطراری ۱۷۲
۱۶-۷- تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه و قطعات یدکی ۱۷۳
۱۶-۸- آموزش اپراتورها ۱۷۳
۱۶-۹- ملاحظات محیط زیستی ۱۷۴
۱۷- فصل هفدهم : پیشگیری، کنترل و مدیریت بو ۱۷۷
۱۷-۱- مقدمه ۱۷۸
۱۷-۲- منابع تولید بو ۱۷۸
۱۷-۳- طراحی و اقدامات برای کاهش بو ۱۸۰
۱۷-۴- سیستم‌های کنترل بو ۱۸۱
۱۸- فصل هیجدهم : طرح‌ریزی اقتضائی، ایمنی و پاسخ به نشت ۱۸۷
۱۸-۱- مقدمه ۱۸۸
۱۸-۲- گازهای سمی ۱۸۸
۱۸-۳- فضاهای سرپوشیده ۱۹۰
۱۸-۴- آتش ۱۹۱
۱۸-۵- مدیریت وسایل نقلیه ۱۹۲
۱۸-۶- پاسخ به نشت و محفظه ایمن ۱۹۲

۱۹– فصل نوزدهم : ارتباطات ۱۹۴
۱۹–۱– مقدمه ۱۹۵
۱۹–۲– ملاحظات آموزش و مشاوره همگانی ۱۹۵
۲۰– فصل بیستم : پایش، نمونه‌برداری و مستندسازی ۱۹۸
۲۰–۱– مقدمه ۱۹۹
۲۰–۲– پایش و نمونه‌برداری ۱۹۹
۲۰–۳– مستندسازی ۱۹۹
مراجع ۲۰۱

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) فناوری‌های تبدیل زباله به انرژی ۴
شکل (۲-۱) تقسیم‌بندی هاضم‌های بی‌هوازی با جریان پیوسته ۱۲
شکل (۲-۲) تقسیم‌بندی هاضم‌های بی‌هوازی با جریان ناپیوسته ۱۲
شکل (۳-۱) تقسیم‌بندی پسماند جامد شهری ۱۵
شکل (۳-۲) تشکیل لایه کف در هاضم بی‌هوازی ۱۹
شکل (۳-۳) بازده بیوگاز بر حسب نرخ بارگذاری مواد آلی [۲۵] ۲۰
شکل (۴-۱) پتانسیل تولید بیوگاز از خوراک‌های متفاوت هاضم ۲۳
شکل (۴-۲) یک نوع واحد بیوگاز برای زائدات کشاورزی و فضولات دامی ۲۶
شکل (۵-۱) نرخ رشد نسبی تولید متان در محدوده دمای مختلف ۳۴
شکل (۵-۲) شماتیک ساختارهای مختلف رآکتور AD ۴۰
شکل (۶-۱) مقایسه نتایج مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی برای OLR برابر ۲؛ الف) مقدار بیوگاز تولیدی در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ب) مقدار متان تولیدی در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ج) میزان متان، بیوگاز، دیاکسیدکربن و ترکیب درصد بیوگاز حاصل از مدلسازی ۵۵
شکل (۶-۲) مقایسه نتایج مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی برای OLR برابر ۲؛ الف) مقدار TAN و PH در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ب) مقدار اسیدهای چرب فرار در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ج) مقادیر TAN، PH و اسیدهای چرب فعال حاصل از مدلسازی ۵۶
شکل (۷-۱) شکست تکنولوژیهای استفاده شده برای ارتقای بیوگاز [۸۹] ۶۱
شکل (۸-۱) مراحل اصلی فرآیند تولید و استفاده از بیوگاز [۹۷] ۶۴
شکل (۸-۲) نمودار جریانی واحد پیشتصفیه شامل سیستم ذخیرهسازی، پیشتصفیه و خوراکدهی (خوراک پسماند شهری) ۶۷
شکل (۸-۳) نمودار جریانی واحد پیشتصفیه شامل سیستم حذف شن و ماسه، لهسازی و خوراکدهی (خوراک فضولات دامی) ۷۰
شکل (۸-۴) نمودار جریانی واحد هاضم شامل رآکتور جریان قالبی، تجهیزات حرارتی و همزن مکانیکی (خوراک پسماند شهری) ۷۲
شکل (۸-۵) نمودار جریانی واحد هاضم شامل راکتور همزندار، تجهیزات حرارتی و مخازن ذخیرهسازی گاز (خوراک فضولات دامی) ۷۳
شکل (۸-۶) نمودار جریانی واحد مدیریت مواد هضمشده شامل پرس تسمهای، پمپها و ذخیرهسازی کود و بیوگاز (خوراک پسماند شهری) ۷۵
شکل (۸-۷) نمودار جریانی واحد مدیریت مواد هضمشده شامل پرس تسمهای، پمپها و ذخیرهسازی کود و بیوگاز (خوراک فضولات دامی) ۷۵
شکل (۸-۸) نمودار جریانی ساده بخش تصفیه بیوگاز ۷۸

شکل (۸-۹) نمودار جریانی واحد تصفیه بیوگاز (خوراک پسماند شهری) ۷۸
شکل (۸-۱۰) نمودار جریانی واحد تصفیه بیوگاز (خوراک فضولات دامی)..... ۷۸
شکل (۸-۱۱) نمودار جریانی واحد CHP (خوراک پسماند شهری) ۸۰
شکل (۸-۱۲) نمودار جریانی واحد CHP (خوراک فضولات دامی) ۸۱
شکل (۸-۱۳) مراحل اصلی اجرای پروژه بیوگاز [۹۷]..... ۸۵
شکل (۹-۱) سهم انرژی زیستی در تأمین انرژی مورد نیاز بخش‌های مختلف جهت تحقق هدف NZE [۱]..... ۹۶
شکل (۹-۲) سهم تقریبی انرژی زیستی از مصرف انرژی نهایی کل [۳] ۹۸
شکل (۹-۳) روند ظرفیت نصب‌شده انرژی زیستی در دنیا [۲] ۹۹
شکل (۹-۴) پتانسیل فضولات دامی، زائدات کشاورزی، پسماند شهری و زائدات جنگلی در استان‌های مختلف کشور [۶] ۱۰۱
شکل (۹-۵) چند نما از نیروگاه تولید بیوگاز به روش هضم بی‌هوازی ۱۰۴
شکل (۹-۶) نقشه چیدمان سایت تأسیسات هضم بی‌هوازی شهر تهران ۱۰۵
شکل (۱۰-۱) مراحل اجرای پروژه تولید و بکارگیری بیوگاز [۳۱] ۱۰۸
شکل (۱۰-۲) رویکرد کلی در یک پروژه نیروگاه بیوگاز [۳۱]..... ۱۰۹
شکل (۱۰-۳) معیارهای انجام مطالعات امکان‌سنجی یک پروژه نیروگاه بیوگاز [۳۱]..... ۱۱۱
شکل (۱۰-۴) مولدهای تولید توان..... ۱۱۷
شکل (۱۰-۵) مسیرهای تبدیل زیست‌توده به برق، گرما و هیدروژن ۱۱۸
شکل (۱۰-۶) تبدیل منابع زیست‌توده به بیوگاز و مواد هضم‌شده و محصولات نهایی..... ۱۱۹
شکل (۱۰-۷) مسیرهای پیشرفته ممکن برای تولید انرژی یا مواد شیمیایی باارزش از بیوگاز..... ۱۲۰
شکل (۱۱-۱) طرحواره فرایند هضم بیهوازی..... ۱۳۱
شکل (۱۱-۲) هضم بیهوازی؛ بخش کلیدی در اقتصاد چرخشی ۱۳۲
شکل (۱۴-۱) انواع هاضم‌های بیهوازی با درصد مواد جامد..... ۱۵۹
شکل (۱۷-۱) اسکرابر تر..... ۱۸۲
شکل (۱۷-۲) فیلترهای کربنی..... ۱۸۴
شکل (۱۷-۳) فیلتر بیولوژیکی و فیلتراسیون بیولوژیکی..... ۱۸۵

فهرست جداول

جدول (۲-۱) ترکیبات بیوگاز ۸
جدول (۲-۲) نمونه‌ای از ناخالصی‌های موجود در بیوگاز ۹
جدول (۳-۱) فاکتورهای فنی مهم برای نیروگاه هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد آلی ۱۶
جدول (۴-۱) مشخصات کود تازه دامی تولیدی به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم دام زنده [۱۳-۱۴] ۲۳
جدول (۴-۲) جمعیت دام کشور در سال ۱۳۹۰ ..... ۲۴
جدول (۴-۳) روش جمع‌آوری کود، درصد رطوبت و نوع فن‌آوری هضم بی‌هوازی مناسب ۲۵
جدول (۵-۱) پارامترهای بهینه پیشنهادی جهت عملکرد مناسب هاضم ۳۸
جدول (۵-۲) خواص بیوگاز ۳۸
جدول (۵-۳) تکنولوژی‌های هضم بی‌هوازی [۳, ۱۶] ۴۱
جدول (۶-۱) نقاط قوت و ضعف مدل ADM1 ..... ۴۸
جدول (۶-۲) پارامترهای مربوط به افزودن مسیر جدید SAO به مدل ADM1 ..... ۵۰
جدول (۶-۳) مشخصات خوراک ورودی به مدل تبدیلکننده ۵۱
جدول (۶-۴) مشخصات خوراک و شرایط اولیه در مدل ADM1 ..... ۵۱
جدول (۶-۵) مشخصات خوراک و شرایط اولیه در مدل ADM1 ..... ۵۳
جدول (۸-۱) مشخصات خوراک مورد استفاده در تخمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری [۹۸, ۹۹] ۶۵
جدول (۸-۲) ویژگی‌های هاضم‌های پیوسته [۹۷] ۷۱
جدول (۸-۳) خصوصیات حداقلی گازهای قابل احتراق [۹۷] ۷۶
جدول (۸-۴) میزان محصولات تولیدی از نیروگاه بیوگاز ۸۶
جدول (۸-۵) هزینه احداث واحد نیروگاه بیوگاز ۸۷
جدول (۹-۱) پتانسیل تئوری و عملی تولید برق از منابع زیست‌توده در ایران به کمک فرایند هضم بی‌هوازی [۵] ۱۰۰
جدول (۹-۲) پتانسیل تئوری و عملی تولید برق از منابع زیست‌توده در ایران به کمک فرایند گازیسازی [۵] ۱۰۰
جدول (۹-۳) موقعیت، ظرفیت و نوع نیروگاه‌های زیست‌توده نصب و بهره‌برداری‌شده در ایران [۷] ۱۰۱
جدول (۱۰-۱) میزان مساحت مورد نیاز جهت احداث نیروگاه بیوگاز بر اساس ظرفیت ۱۱۲
جدول (۱۱-۱) منافع هضم بیهوازی ۱۳۰
جدول (۱۳-۱) عوامل اصلی افزایش یا کاهش حریم مورد نیاز ۱۴۰
جدول (۱۳-۲) دیگر معیارهای مؤثر بر اندازه حریم مورد نیاز ۱۴۰
جدول (۱۴-۱) مقایسه بین سامانه‌های هضم مزوفیلیک و ترموفیلیک ۱۵۷
جدول (۱۷-۱) ترکیبات بالقوه بودار در تأسیسات هضم بیهوازی ۱۸۰
جدول (۱۸-۱) غلظت سولفید هیدروژن ۱۸۹
جدول (۱۹-۱) ابزار مشاوره و آموزش همگانی ۱۹۶

مقدمه

مدیریت مواد زائد جامد که از مرحله تولید زباله تا دفع کامل زباله را دربر می‌گیرد، همواره هزینه‌های سنگینی را بر شهرها تحمیل می‌نماید. با افزایش روزافزون جمعیت شهرها و دگرگون شدن نحوه زندگی به سوی مصرف‌گرایی، هزینه‌های مدیریت مواد زائد جامد افزایش خواهند یافت و از طرف دیگر، کمبود زمین برای دفن زباله، فشارهای ناشی از بار آلودگی زباله‌ها بر منابع طبیعی و تهدید منافع حیاتی انسان‌ها نیز بر سنگینی هزینه‌ها خواهند افزود. مسئولین شهری و مدیران مواد زائد جامد ناگزیر خواهند بود که روش‌های مناسبی برای کاهش هزینه‌ها و جبران بخشی از هزینه برگزینند. یافتن یک روش منفرد کاری بسیار دشوار بوده و آن‌چه که برای مجموعه مدیریت مواد زائد جامد یک شهر سودمند خواهد بود، مجموعه‌ای از روش‌ها و سیاست‌های هماهنگ است که در جهت بهبود فناوری‌های دفع زباله‌ها اتخاذ می‌گردند.

بهره‌گیری از فن‌آوری هضم بی‌هوازی، به عنوان رویکردی نویدبخش به‌خصوص در طرح‌های توسعه، مدیریت و ساماندهی ضایعات آلی تولیدشده در مناطق شهری و روستایی مورد توجه قرار گرفته است. بیوگاز به عنوان یک منبع تجدیدپذیر انرژی با منافع اقتصادی- اجتماعی بسیار که نقش به سزایی در حل معضلات محیط زیستی ناشی از آلاینده‌ها و ضایعات آلی تولیدشده در جوامع انسانی دارد، توجه بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، در حال توسعه و سازمان‌های بین‌المللی را به خود جلب کرده است.

استفاده از روش‌های جدید تولید انرژی که معایب روش‌های کلاسیک را نداشته باشند، امری متداول در سراسر جهان شده است. افزایش راندمان تولید بیوگاز در هاضم‌های بی‌هوازی از مسائلی است که همواره مد نظر محققین و کاربران قرار داشته و دارد. سعی و تلاش در طراحی این راکتورها بر این بوده است که کارایی فرآیند تخمیر در این سامانه‌ها بالا رفته، کیفیت و کمیت بیوگاز حاصله بهبود بخشیده شده و مایع خروجی از راکتور دارای حداقل بار آلودگی باشد.

هر چند که در جهان امروزی به حداقل رساندن دفن پسماندها در اولویت قرار داشته و از همین رو، مدیریت پسماند و استحصال انرژی از آن حائز اهمیت است، اما در ایران هنوز بحث استحصال انرژی از پسماند و توسعه کاربرد فناوری‌های مرتبط با آن مغفول مانده است. چنانچه قرار بر اجرای طرح‌های استحصال انرژی از پسماند باشد بهتر است از فناوری‌های به‌روز استفاده شود که علاوه بر عملکرد بهتر، اثرات مخرب زیست‌محیطی کمتری نیز بر محیط زیست دارند.

۱- فصل اول : انواع نیروگاه WTE

۱-۱- مقدمه

اولین قدم و مهمترین قدم در سلسله مراتب مدیریت پسماند پیشگیری از تولید پسماند است و قدم بعدی کاهش تولید زباله یا به نوعی بازاستفاده است. روش های بازیافت مواد همچون کمپوستینگ یا هضم بی‌هوازی در اولویت بعدی هستند. پس از آن بازیابی مواد یا تبدیل پسماند به انرژی همچون روش‌هایی مثل زباله‌سوزی، پیرولیز یا استحصال گاز از دفنگاه قرار دارند. در نهایت در صورتی که نتوان پسماند را با هریک از این روش ها مدیریت نمود می‌توان به دفع (دفن) آن فکر کرد که دفنگاه یا زباله‌سوزی بدون بازیابی انرژی در همین سطح هستند. از مباحث مهم و قابل توجه در مدیریت پسماند استفاده از منابع زیست‌توده به منظور از بین بردن زائدات و همچنین تولید انرژی از پسماندهای جامد در ابعاد شهری و روستایی می‌باشد. در حال حاضر فن‌آوری‌ها و روش‌های مختلفی برای مدیریت پسماند و تولید انرژی مطرح است. در برخی از این فن‌آوری‌ها، تولید انرژی و در برخی دیگر امحاء پسماند در اولویت می‌باشد.

۱-۲- زیست‌توده[1]

زیست‌توده عبارت است از اجزای قابل تجزیه زیستی از محصولات، پسماندها و زائدات کشاورزی (شامل موادگیاهی و دامی)، جنگل‌ها و صنایع وابسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل تجزیه. زیست‌توده حاوی انرژی شیمیایی ذخیره شده از خورشید است. گیاهان از طریق فتوسنتز زیست‌توده تولید می‌کنند. زیست‌توده بر پایه کربن است و از مخلوط مولکول‌های آلی، شامل هیدروژن، معمولاً اکسیژن و اغلب نیتروژن و مقدار کمی از دیگر اتم‌ها مانند فلزات قلیایی، فلزات قلیایی خاکی و فلزات سنگین تشکیل شده است. در واقع زیست‌توده یا بیومس یک منبع انرژی تجدیدپذیر است که از مواد زیستی به دست می‌آید و می‌توان آن را مستقیماً برای تولید گرما سوزاند و یا طی فرآیندهای مختلف به سوخت مایع و گازی تجدیدپذیر تبدیل کرد [۵۷].

۱-۳- انرژی زیستی[2]

انرژی حاصل از انواع توده‌های زیستی از جمله زائدات کشاورزی و جنگلی، انواع پسماند و موادی که با هدف تولید انرژی کشت می‌شوند انرژی زیستی نام دارد. زیست‌توده را می‌توان به گرما تبدیل کرد و از آن در منازل یا واحدهای صنعتی استفاده نمود، یا می‌توان آنها را به برق تبدیل کرد و یا این که آنها را به سوخت‌های مایع یا گاز تبدیل نمود

[1] Biomass
[2] Bioenergy

و در بخش حمل و نقل استفاده کرد. این انعطاف‌پذیری در بین انواع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر منحصر به فرد است. روش‌های متداول تبدیل انرژی زیست‌توده که شامل احتراق سوخت به منظور تولید برق و حرارت، هضم بی‌هوازی به منظور تولید متان برای تولید برق و حرارت و تبدیل مواد قندی و نشاسته‌ای به اتانول یا تبدیل روغن‌های گیاهی به بیودیزل می‌شود همگی فناوری‌هایی بالغ و تجاری می‌باشند.
در سال ۲۰۱۵، محرک‌های تولید و استفاده از انرژی زیست‌توده، افزایش سریع تقاضای انرژی در برخی از کشورها و نگرانی‌ها و اهداف زیست‌محیطی منطقه‌ای و جهانی بوده است.
چالش‌های این حوزه شامل کاهش قیمت سوخت‌های فسیلی و کاهش شدید بهای تولید انرژی از سایر منابع تجدیدپذیر به ویژه انرژی بادی و پنل خورشیدی بوده است. سایر چالش‌های توسعه حوزه انرژی زیست‌توده را می‌توان به مباحث پیوسته در مورد پایدار بودن انرژی زیستی، از جمله تغییر غیرمستقیم کاربری اراضی و تراز کربن مرتبط دانست.
بیوانرژی در مقایسه با سایر تجدیدپذیرها سهم بیشتری در تأمین انرژی اولیه دارد. در سال ۲۰۱۵ سهم بیوانرژی در تأمین انرژی اولیه حدود ۶۰ اگزاژول (EJ) بوده است. از سال ۲۰۱۰ تا کنون استفاده از زیست‌توده برای تولید انرژی سالیانه ۲٪ رشد داشته است. از سال ۲۰۰۵ تا کنون علیرغم این که تقاضای جهانی انرژی حدود ۲۴٪ افزایش یافته، اما سهم بیوانرژی از کل انرژی اولیه مصرفی تقریباً ثابت باقی مانده است (حدود ۱۰٪).

۱-٤- فن‌آوری‌های تولید انرژی از پسماند

تبدیل زباله به انرژی[1] (WtE)، که به آن دریافت انرژی از زباله[2] (EfW) نیز گفته می‌شود، به فرایند تولید انرژی به شکل برق و یا حرارت از زباله اطلاق می‌شود. در حقیقت، WtE شکلی از بازیافت انرژی است. در اغلب فرایندهای WtE، برق و یا حرارت به صورت مستقیم از طریق احتراق تولید شده و یا این که سوخت قابل اشتعال مانند متان، متانول، اتانول یا سوخت‌های سنتزی تولید می‌شود.
امروزه WtE تبدیل مواد غیرقابل بازیافت زباله به حرارت، برق یا سوخت می‌باشد. عمل تبدیل زباله به انرژی (WtE) از طریق فناوری‌هایی صورت می‌گیرد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

[1] Waste to Energy
[2] Energy from Waste



شکل (۱-۱) فناوری‌های تبدیل زباله به انرژی

فن‌آوری‌های تولید انرژی از پسماند، با درجات بسیار متفاوتی از پیچیدگی و دامنه کاربرد، عمدتاً در کشورهای توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان زباله‌سوزی به لحاظ قدمت بیشتر نقش اصلی را داراست؛ به طوری که در کشور ایالات متحده، تبدیل پسماند به انرژی مترادف با زباله‌سوزی است. همچنین در دو دهه گذشته، بسیاری از دفنگاه های قدیم و جدید به تأسیسات استحصال گاز و بازیافت انرژی مجهز شدند که این امر باعث شده بازیابی گاز دفنگاه یکی از فن‌آوری‌های مهم در این زمینه قلمداد شود. هضم بی‌هوازی، تنها در اروپا توسعه‌ای محدود یافته است و البته استفاده از تولید سوخت مشتق از زباله[1] نیز روند صعودی داشته است.

فن‌آوری‌های تولید انرژی از پسماند که به مرحله تجاری‌سازی رسیده و از لحاظ تعداد واحدهای اجراشده و سابقه فن‌آوری، تثبیت‌شده محسوب می‌شوند به طور کلی به دو دسته قابل تقسیم هستند:

- فن‌آوری‌های حرارتی
- فن‌آوری‌های بیولوژیکی

نمایندگان اصلی فن‌آوری‌های حرارتی عبارتند از زباله‌سوزی، پیرولیز و گازی‌سازی. همچنین در مورد فن‌آوری‌های بیولوژیکی، هضم بی‌هوازی و دفن‌گاه قابل طرح می‌باشند.

[1] Refused Drived Fuel (RDF)

۱-۵- نتیجه‌گیری

هر یک از فناوری‌های استحصال انرژی از پسماند، کارکرد مشخصی برای مصرف‌کننده نهایی دارد. در حال حاضر فناوری‌های احتراق مستقیم (زباله‌سوز توده‌سوز و RDF سوز) بیشترین تعداد واحدهای نصب‌شده در دنیا را دارند، اما این امکان وجود دارد که در آینده این وضعیت دستخوش تغییرات شود.

فناوری‌های گازی‌سازی، گازی‌سازی پلاسما و پیرولیز در مقایسه با فناوری‌های زباله‌سوزی آلایندگی کمتری دارند که دلیل آن تفاوت ویژگی‌های فرایندی این فناوری‌ها است.

گازی‌سازی پلاسما در مقایسه با سایر فناوری‌ها دارای کمترین میزان آلایندگی است، اما تعداد واحدهای نصب‌شده آن در دنیا بسیار کم است. اما به دلیل این که به طور کامل قادر به امحاء زباله است در آینده مقبولیت یافته و تعداد واحدهای نصب‌شده آن افزایش خواهد یافت.

تعدادی واحد با فناوری پیرولیز در دنیا وجود دارد. اما در آینده از این فناوری عمدتاً برای تولید سوخت زیستی استفاده خواهد شد و واحدهای کمتری با هدف تولید برق نصب خواهد شد.

فناوری‌های استحصال انرژی از پسماند در مقایسه با سایر فناوری‌های تجدیدپذیر نیاز به سرمایه‌گذاری به مراتب بالاتری دارند، اما درآمد حاصل از این فناوری‌ها نیز بیشتر می‌باشد. درآمد این فناوری‌ها علاوه بر فروش برق، فروش مواد بازیافتی و هزینه امحاء پسماند (gate fee) می‌باشد.

۲- فصل دوم : مبانی فن‌آوری هضم بی‌هوازی

۲-۱- مقدمه

هضم بی‌هوازی فرایند تخمیر مواد آلی در عدم حضور اکسیژن و در دما، غلظت مناسب و اختلاط مواد آلی می‌باشد. مهم‌ترین محصول فرایند هضم بی‌هوازی بیوگاز است. بیوگاز ترکیبی است از گاز متان، دی اکسید کربن و مقدار اندکی از گازهای دیگر. بیوگاز تولیدی از فرایند هضم بی‌هوازی پس از تصفیه می‌تواند به طرق مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. بیوگاز تولیدی می‌تواند در محل به منظور تولید انرژی حرارتی و الکتریسیته مورد استفاده قرار گیرد، فشرده شده و وارد شبکه گاز رسانی شده و به عنوان بیومتان مورد بهره‌برداری قرار بگیرد و یا در نهایت به عنوان سوخت خودرو مصرف شود. هاضم بی‌هوازی نیز مانند سایر فن‌آوری‌های تبدیل زیست‌توده به انرژی می‌تواند مواد اولیه متفاوتی را پردازش کند. بنابراین، پسماندهای آلی شهری که مشتمل بر پسماندهای آشپزخانه‌ای و سایر پسماندهای آلی می‌شوند می‌توانند ورودی خوبی برای هاضم بی‌هوازی باشند. سیستم هاضم روشی کنترل‌شده است که در مخازنی با طراحی ویژه صورت می‌پذیرد. محصول دیگر سیستم هاضم ماده هضم‌شده می‌باشد که ماده ای غنی از نیتروژن بوده و می‌تولند بعد از طی فرایندهایی به عنوان کود در کاربری های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. هضم بی‌هوازی برای پذیرش پسماندهای آلی شهری معمولاً سه مرحله پیش‌پردازش، هضم بی‌هوازی و پس‌پردازش را در بر می‌گیرد. در مرحله پیش‌پردازش، ورودی‌های مضر و غیرآلی از توده پسماند به وسیله پردازش مکانیکی جدا می‌شوند. در مرحله هضم بی‌هوازی، فن‌آوری‌های متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فن‌آوری‌ها را می‌توان بر اساس تعداد مراحل هضم، میزان رطوبت زیست‌توده، دمای مخزن و سایر موارد تقسیم‌بندی کرد.

۲-۲- بیوگاز

زیست‌گاز[1] یا بیوگاز ترکیبی از گازهای متان و دی اکسید کربن می‌باشد که بر اثر تجزیه و تخمیر مواد آلی (مانند فضولات حیوانی، فاضلاب انسانی و ضایعات گیاهی) در غیاب اکسیژن و فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی، در یک محفظه بسته[2] بوجود می‌آید. این گاز شامل دو جزء عمده متان و دی اکسید کربن به همراه مقادیر جزئی ناخالصی نظیر H_2S، بخار آب، N_2 و ... می‌باشد. عنصر باارزش بیوگاز، متان می‌باشد که هرچه درصد آن بالاتر باشد کیفیت بیوگاز بهتر و تولید آن به صرفه‌تر می‌باشد [۳]. بیوگاز مانند سایر سوخت های گاز قابل احتراق بوده و با نسبت ۱ به ۲۰ با هوا مخلوط شده و سرعت اشتعال آن بالا می‌باشد [۷]. این مخلوط گازی دارای ارزش حرارتی متوسط ۲۱/۶ مگاژول به ازاء هر متر مکعب با ۶۰ درصد متان خواهد بود و در صورت تبدیل به الکتریسیته با استفاده از موتورهای موجود می‌توان نزدیک به ۷/۲ مگاژول الکتریسیته از هر متر مکعب آن به دست آورد [۵]. یک متر مکعب بیوگاز معادل ۰/۴ کیلوگرم سوخت دیزل، ۰/۶ کیلوگرم نفت و ۰/۸ کیلوگرم زغال سنگ است [۱۸].

[1] Biogas
[2] Digester tank

جدول)۲-۱(ترکیبات بیوگاز

نام گاز	فرمول	درصد ترکیب
متان	CH_4	٪ ۶۵ – ۵۵
گاز کربنیک	CO_2	٪ ۴۵ – ۳۵
نیتروژن (ازت)	N_2	٪ ۳ – ۰
هیدروژن	H_2	٪ ۱ – ۰
اکسیژن	O_2	٪ ۱ – ۰
هیدروژن سولفید	H_2S	٪ ۱ – ۰

جدول (۲-۱)، گازهای تشکیل‌دهنده بیوگاز را نشان می‌دهد. سهم دقیق این گازها در بیوگاز بستگی به شرایط تولید، نوع فرآیند و خوراک هاضم دارد. بیوگاز به طور معمول به‌وسیله بخار آب اشباع شده است. جدول (۲-۲) نمونه‌ای از ترکیب بیوگاز و اثرات ناشی از وجود ناخالصی‌های موجود در آن را نشان می‌دهد.

مقدار یا حجم بیوگاز به طور معمول با واحد نرمال متر مکعب (Nm^3) بیان می‌شود، که در واقع حجم گاز در صفر درجه و فشار اتمسفر می‌باشد. مقدار انرژی بیوگاز بر حسب واحد ژول (J) یا وات ساعت (Wh) بیان می‌گردد. در مراجع مقدار انرژی متان خالص ۹/۸۱ کیلووات ساعت بر نرمال متر مکعب آورده شده است. اما مقدار انرژی بیوگاز، از ۸/۵-۴/۵ کیلووات ساعت بر نرمال متر مکعب متغیر است، که بستگی به مقدار متان، دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای موجود در آن دارد.

هر دو گاز متان و دی‌اکسیدکربن بی‌بو هستند. بنابراین، معمولاً بویی که از بیوگاز خام به مشام می‌رسد، مربوط به حضور ترکیبات گوگرد از جمله سولفید هیدروژن و مرکاپتان‌ها می‌باشد. بیوگاز ممکن است در غلظت حدود ۵-۲۰ درصد در هوا، بسته به غلظت متان موجود، مشتعل شود. متان از هوا سبکتر است، در حالی که دی‌اکسیدکربن سنگین‌تر است، که این مسأله یکی از مزیت‌های بیوگاز از نقطه نظر ایمنی می‌باشد، زیرا متان به سادگی بالا رفته و به سرعت با هوا ترکیب می‌شود.

جدول)۲-۲(نمونه‌ای از ناخالصی‌های موجود در بیوگاز

اجزاء	درصد ترکیب (٪ حجمی)	اثرات
CO_2	٪۲۵-۵۰	▪ ارزش حرارتی را کمتر می‌کند. ▪ خواص ضدضربه موتورها را افزایش می‌دهد. ▪ در صورتی که مرطوب باشد باعث خوردگی می‌شود (در غلظت کم اسید کربنیک). ▪ پیل‌های سوختی قلیایی را تخریب می‌کند.
H_2S	٪۰-۰/۵	▪ اثر خورندگی در تجهیزات در سیستم‌های لوله‌کشی دارد. ▪ در صورتی که احتراق کامل نباشد موجب انتشار SO_2 بعد از سوختن یا تولید H_2S می‌شود. ▪ کاتالیزورها را از بین می‌برد.
NH_3	٪۰-۰/۰۵	▪ انشار NO_2 بعد از سوختن، باعث تخریب پیل‌های سوختی می‌شود. ▪ خواص ضدضربه موتورها را افزایش می‌دهد.
بخار آب	٪۱ -۵	▪ ایجاد خطر انجماد سیستم لوله‌کشی و نازل‌ها ▪ اثر خورندگی در تجهیزات در سیستم‌های لوله‌کشی دارد.
Dust	>۵µm	▪ باعث مسدود شدن نازل‌ها و پیل‌های سوختی می‌گردد.
N_2	٪۰-۵	▪ ارزش حرارتی را کمتر می‌کند. ▪ خواص ضدضربه موتورها را افزایش می‌دهد.
Siloxanes	۰-۵۰mg/m^3	▪ باعث سایش و تخریب موتور می‌شود.

۲-۳- منابع اصلی زیست‌توده برای تولید بیوگاز

گرچه انواع مختلف زیست‌توده شکل و ظاهر مشترکی دارند، اما تنوع قابل توجهی را در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی نشان می‌دهند. به طور کلی، همه نوع زیست‌توده می‌تواند به عنوان خوراک هاضم در فرآیند بی‌هوازی مورد استفاده قرار گیرد، در صورتی که کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و همی‌سلولز جزء مواد اصلی آنها باشد. زمانی که زیست‌توده به عنوان خوراک انتخاب می‌شود بایستی موارد زیر را در نظر داشت:

- نوع خوراک باید برای فرآیند هضم بی‌هوازی انتخاب شده، مناسب باشد.
- ارزش غذایی مواد آلی بایستی تا حد امکان بالا باشد، تا حجم گاز تولیدی حداکثر شود.
- خوراک هاضم باید عاری از هر گونه آلودگی توسط میکروارگانیسم‌های مزاحم باشد، زیرا در عمل هضم اختلال ایجاد می‌کند.
- مقدار مواد مضر و بازدارنده تا حد امکان به حداقل برسد.
- به ترکیب بیوگاز توجه شود تا برای استفاده در مراحل بعدی مناسب باشد.

منابع اولیه اصلی برای تولید بیوگاز بدین شرح هستند:
۱- فضولات دامی
۲- زائدات کشاورزی
۳- فاضلاب‌های شهری
٤- پسماندهای تجزیه‌پذیر شهری

۲-٤- معرفی فرایند هضم بی‌هوازی

فرایند هضم بی‌هوازی به صورت طبیعی و در غیاب اکسیژن برای تجزیه مواد آلی در طبیعت رخ می‌دهد. به دلیل سرعت کم انجام این واکنش ها به صورت طبیعی، انسانها ناگزیر شده‌اند که به صورت مصنوعی این واکنش‌ها را ایجاد و یا تسریع کنند. موارد زیادی وجود دارد که هضم بی‌هوازی برای تثبیت مواد آلی به کار رفته است. این عمل علاوه بر جلوگیری از آلودگی محیط زیست، باعث تولید گاز متان که ارزش سوختی بالایی دارد، می‌شود. هضم بی‌هوازی یک فرایند کاملاً باکتریایی می‌باشد [۱۸]. انواع گوناگونی از باکتری‌ها که در سوخت و ساز تا حد زیادی به یکدیگر وابسته‌اند، در این فرایند درگیر هستند. باکتری‌های تولیدکننده بیوگاز در کنار توانمندی برای زندگی بدون اکسیژن، ویژگی خاص دیگری نیز دارند؛ آن‌ها جانداران بسیار کوچکی هستند که می‌توانند سلولوز را که بخش اصلی فیبرهای گیاهی است هضم کنند. از دیگر ویژگی آن‌ها حساس بودن به شرایط محیطی همچون دما، اسیدیته، غلظت و ... می‌باشد [۲۳]. انجام تحقیقات نسبتاً گسترده در زمینه هضم بی‌هوازی، اطلاعات جامعی در زمینه‌های میکروبیولوژی و بیوشیمی، فاکتورهای محیطی، تجزیه‌پذیری و جنبه‌های بهداشتی مربوط به این فرآیند را فراهم نموده است، که آگاهی از این اصول برای طراحی و بهره‌برداری و درک کیفیت عملکرد هر نوع هاضم بی‌هوازی لازم و ضروری است.
واکنش تخمیر شامل یک سری فعل و انفعالات شیمیایی به هم پیوسته می‌باشد که در عین مجزا بودن، ارتباط تنگاتنگی با یگدیگر دارند [۴]. به طور کلی فرآیند هضم بی‌هوازی در طی ۴ مرحله انجام می‌گیرد که هر مرحله آن توسط گونه‌ای خاص از باکتری‌های بی‌هوازی به انجام می‌رسد.

۲-۵- تقسیم‌بندی انواع هاضم بی‌هوازی

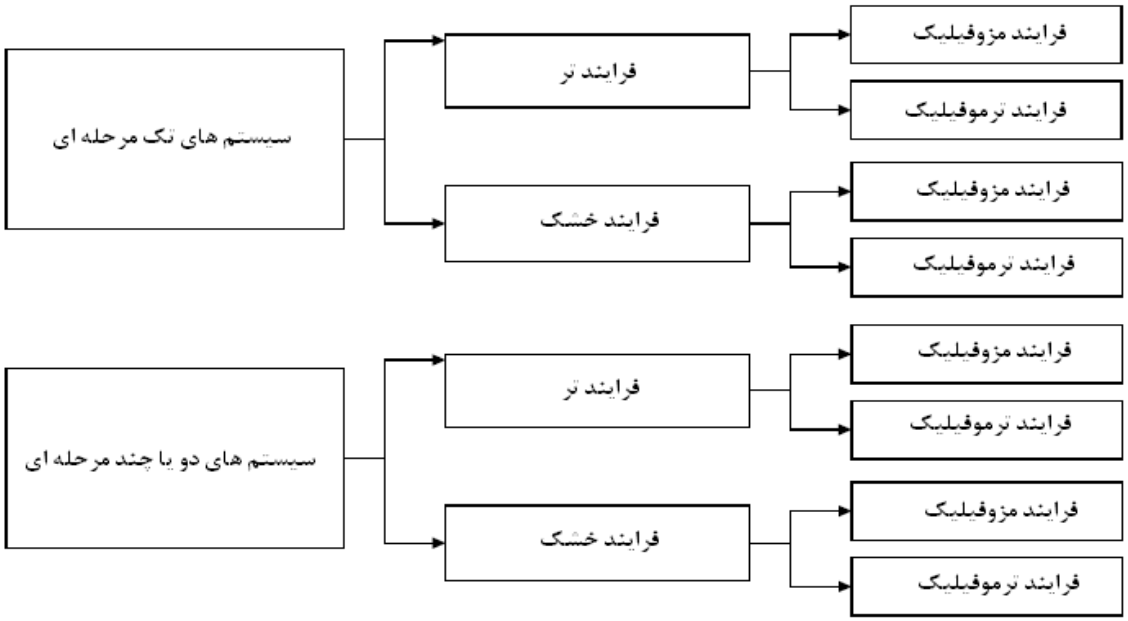
همه هاضم‌های بی‌هوازی عملکرد اصلی یکسانی دارند. آنها کود را در غیاب اکسیژن نگه می‌دارند و شرایط مناسب را برای رشد میکروارگانیسم‌های تشکیل دهنده متان حفظ می‌کنند. هاضم‌های بی‌هوازی در طیف گسترده ای وجود دارند که هرکدام این عملکرد اصلی را به روشی کاملاً متفاوت انجام می‌دهند. در طول دو دهه گذشته، پیشرفت‌های چشمگیری در درک فرایند بی‌هوازی انجام شده است. الزامات اساسی برای طراحی هضم بی‌هوازی عبارتند از:

- به حداکثر رساندن تخریب مواد جامد فرار (VS) و عملکرد متان
- بارگیری مداوم و پایدار مواد آلی (OLR) و مدت زمان ماند هیدرولیک کوتاه (HRT)
- کاهش حجم راکتور
- اطمینان از اختلاط کامل و انتقال مؤثر مواد آلی (زیســت‌توده میکروبی فعال) به منظور آزاد کردن حباب‌های گازی موجود در محیط و جلوگیری از رسوب‌گذاری

سایر الزامات نیز عبارتند از:

- کاهش میزان انرژی فرایند و اتلاف گرما
- کنترل بو؛ و در نهایت،
- دستیابی به یک سیستم قابل اعتماد با کمترین هزینه ممکن نصب و راه‌اندازی

هاضم‌های بی‌هوازی از دیدگاه‌های مختلف قابل بررسی و تقسیم‌بندی می‌باشند. به طور مثال، می‌توان این هاضم‌ها را از لحاظ نوع خوراک‌دهی، تعداد راکتورها، زمان ماند، نوع اختلاط، بازچرخانی شیرابه و .... تقسیم‌بندی کرد.
هاضم‌ها بر اساس نوع خوراک‌دهی به دو دسته راکتورهای پیوسته و ناپیوسته تقسیم می‌شوند. هاضم‌های پیوسته بر اساس تعداد راکتورها به دو نوع "تک مرحله‌ای" و "دو یا چند مرحله‌ای" تقسیم می‌شوند. هاضم‌های ناپیوسته را می‌توان بر اساس تعداد و ترکیب راکتورها، به سه نوع راکتور ناپیوسته تک مرحله‌ای، راکتورهای ناپیوسته متوالی و راکتورهای ناپیوسته هیبریدی تقسیم کرد [۳۱، ۳۶، ۳۹، ۴۱ و ۵۰]. هر کدام از این راکتورها بر اساس درصد مواد جامد در خوراک ورودی به دو دسته هاضم با غلظت بالای مواد جامد (خشک) و هاضم با غلظت پایین مواد جامد (تر) تقسیم می‌شوند. در هاضم‌های حاوی مقدار جامدات پایین (LS) یا تر، غلظت کل جامدات (TS) کمتر از ۱۵ درصد می‌باشند و در هاضم‌های حاوی مقدار جامدات بالا (HS) یا خشک، غلظت TS در محدوده ۴۰-۱۵ درصد می‌باشد.



شکل (۲-۱) تقسیم‌بندی هاضم‌های بی‌هوازی با جریان پیوسته



شکل (۲-۲) تقسیم‌بندی هاضم‌های بی‌هوازی با جریان ناپیوسته

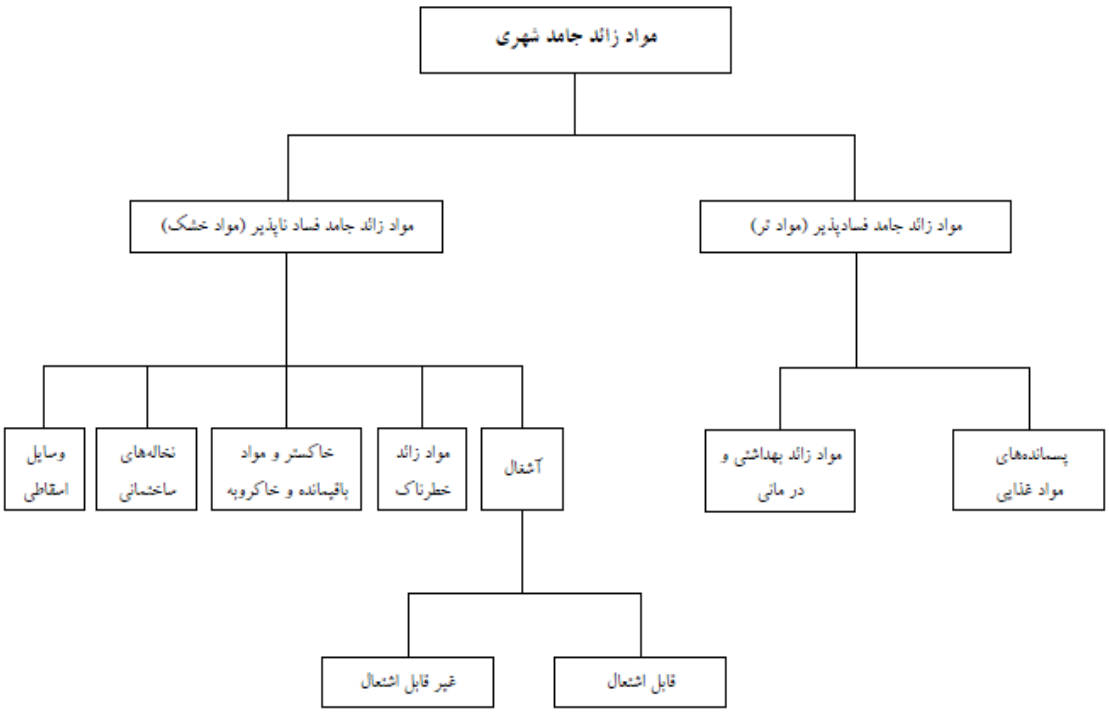
۳- فصل سوم : فن‌آوری هضم بی‌هوازی مناسب برای زباله شهری

۳-۱- مقدمه

توجه به استفاده و گسترش انواع هاضم‌ها می‌تواند عملکرد مناسبی در فرایند تثبیت و تولید انرژی از پسماندهای آلی داشته باشد. توسعه این فن‌آوری می‌تواند، تأثیر شگرفی در مدیریت پسماند شهری و تولید انرژی از منابع زیست‌توده خصوصاً نیروگاه‌های تولید برق از زباله‌های شهری داشته باشد.
فاکتورهای اثرگذار بر فرآیند هضم بیهوازی به انضمام دانش و نگرش فنی، باعث توسعه انواع متفاوتی از نیروگاه‌های هضم بی‌هوازی در مقیاس کامل شد. کمپانیهای بسیاری در این زمینه کار کرده اند ولی هنوز نمی‌توان از یک کمپانی یا فن‌آوری مشخص به عنوان صاحب سهم عمده‌ای از بازار تجاری این فرایند نام برد.
آگاهی از این فن‌آوری، کسب تجربه و اطمینان از عملکرد مناسب این نوع سیستم‌ها در زباله‌های شهری می‌تواند ضمن ایجاد فرصت مناسب برای تولید انرژی و بهبود قابل توجه کیفیت کمپوست تولیدی از زباله شهری در مقایسه با روش‌های موجود، خطر ریسک‌پذیری (فنی، اقتصادی و محیط زیستی) در انتخاب و ساخت هاضم‌های بزرگ از این نوع را در کشور به حداقل برساند. بررسی و شناخت فرایندهای هضم بی‌هوازی و طراحی و ساخت یک واحد قابل کاربرد و توسعه در تولید انرژی از زباله‌های شهری در ایران می‌تواند فضایی جدید را دراین زمینه به روی مسئولین باز نماید. نتایج حاصله می‌تواند راهگشای مسئولین و تصمیم‌گیرندگان، مهندسین مشاور و پیمانکاران در طراحی و ساخت و توسعه نیروگاه‌های بیوگازی و مدیریت پسماند شهری باشد.

۳-۲- پسماندهای شهری

پسماندهای شهری شامل زائدات جامد شهری می‌شود. پسماندهای جامد شهری عبارت از زائدات جامدی است که از عملیات تجاری، اداری، خانگی و بعضی از صنایع به‌دست می‌آید. از میان زائدات جامد شهری فقط پسماندهای آلی قابل تجزیه هستند. لذا قبل از استفاده از این پسماندها در فرآیند هضم بی‌هوازی بایستی اجزاء غیرآلی آن جدا گردد. میزان زائدات تجزیه‌پذیر در پسماندهای شهری بستگی به عوامل مختلفی از جمله محل تولید، نوع آب و هوا، فرهنگ و پیشرفت فن‌آوری دارد.
ترکیب خوراک هاضم می‌تواند بسیار متنوع و گسترده باشد. ترکیب خوراک ورودی به هاضم عامل اصلی و مؤثر در بهرهٔ متان و نرخ تولید متان در هاضم‌های بی‌هوازی می‌باشد. جهت بررسی امکان‌پذیری کاربرد فن‌آوری هضم بی‌هوازی به منظور تصفیه و تولید انرژی از مواد زائد جامد شهری، مهمترین عامل کیفیت زباله تولیدی از لحاظ تجزیه‌پذیری بیولوژیکی می‌باشد. بدیهی است که هر چه میزان مواد فسادپذیر در پسماند تولیدی بیشتر باشد، قابلیت تصفیه‌پذیری و تولید انرژی از آن بیشتر می‌باشد.
مواد زائد جامد شهری را می‌توان به دو گروه کلی مواد فسادپذیر و فسادناپذیر تقسیم‌بندی کرد. مواد زائد فسادپذیر شامل پسماندهای مواد غذایی و مواد زائد مراکز بهداشتی و درمانی است. گروه فسادناپذیر، شامل پسماند (کاغذ، مقوا، پلاستیک، منسوجات، لاستیک، چرم و چوب و مبلمان و اضافات باغبانی)، مواد زائد خطرناک (غیر از مواد زائد ویژه بیمارستانی)، خاکروبه، خاکستر، مواد باقیمانده، نخاله‌های ساختمانی و وسایل اسقاطی است.



شکل (۳-۱) تقسیم‌بندی پسماند جامد شهری

شناخت منابع و نوع مواد زائد جامد، ترکیبات و نوع تولید و نرخ تولید این مواد، جهت مدیریت مواد زائد جامد ضروری است. میزان بالای مواد فسادپذیر نشان‌دهنده این است که زباله تولیدی جهت تصفیه در هاضم‌های بی‌هوازی بسیار مناسب می‌باشد. البته عامل دیگری که می‌تواند بر روی میزان تصفیه‌پذیری بیولوژیکی بی‌هوازی مواد زائد جامد شهری مؤثر باشد، محتوای مواد مغذی (نیتروژن و فسفر به ویژه نیتروژن) می‌باشد که به صورت نسبت C/N/P شناخته می‌شود و باید مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۳- هاضم پسماند شهری

هاضم جزء اصلی یک سیستم بیوگاز است. انتخاب فن‌آوری مناسب به عوامل متعددی وابسته است [۱۵]:

- در دسترس بودن خوراک
- مشخصه‌های خوراک
- کیفیت و کمیت خوراک
- درصد ماده خشک و نیاز به گندزدایی
- مصرف انرژی و مشوق‌ها (مانند تعرفه‌ها) و تقاضای محلی انرژی
- میزان گیت فی به ازای زباله دریافتی
- شرایط حمل و نقل

- بازار مصرف نهایی مواد هضم‌شده
- مهارت و دانش بهره‌برداری
- شرایط اقلیمی محل احداث
- دسترسی به منابع مالی

یک قانون کلی برای انتخاب فن‌آوری برتر وجود ندارد. بنابراین، پیش از احداث یک نیروگاه لازم است نظر خبرگان در مورد انتخاب فن‌آوری مناسب اخذ شود. فن‌آوری‌ها و تجهیزات متعلق به آن باید محکم و قابل اطمینان باشند و در کل، سیستم باید بادوام، کارآمد و ایمن باشد.

۳-٤- الزامات انتخاب فن‌آوری هضم بی‌هوازی

هنگام انتخاب فن‌آوری برای نیروگاه هضم پسماندهای جامد آلی، موارد بسیاری را باید مد نظر داد. بهره‌برداری ایمن و راحت از نیروگاه مستلزم انتخاب فن‌آوری مناسب است. به طور کلی، ملاحظات اقتصادی زیادی برای نیروگاه‌های هضم بیهوازی در نظر گرفته نشده و الزامات قانونی در زمینه استفاده از مواد هضم‌شده، سر و صدا و بوی ایجادشده از نیروگاه در کنار الزامات محیط زیستی، نیاز به توجه بیشتری دارد. انتخاب فن‌آوری که با توجه به ساختار و الزامات فرایند صورت می‌گیرد، اثر قابل توجهی در عملکرد کلی سیستم دارد.

جدول)۳-۱(فاکتورهای فنی مهم برای نیروگاه هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد آلی

دریافت پسماند	▪ توزین جهت اخذ بهای دفع پسماند و تخمین مقدار پسماندی که باید مدیریت شود ▪ ذخیره پسماند در انبارها و یا سیلوها برای تأمین جریان یکنواخت مواد ورودی به هاضم ▪ کنترل کیفیت ظاهری پسماند
پیش‌پردازش	▪ حذف مواد نامطلوب که می‌تواند باعث تخریب فرایند یا کیفیت ماده باقی‌مانده شود ▪ کاهش اندازه پسماند قبل از تصفیه بی‌هوازی ▪ بهداشتی کردن پسماند در صورت نیاز
ذخیره‌سازی و تغذیه	میزان پیش‌تصفیه مورد نیاز، به ماهیت پسماند جمع‌آوری شده و نیازمندی‌های فرایند بستگی دارد. ▪ سیستم ذخیره‌سازی و تغذیه، برای کنترل نوسانات موجود در پسماند دریافتی ▪ سیستم تغذیه باید مطابق با میزان بارگذاری و استراتژی تغذیه (منقطع، پیوسته یا نیمه‌پیوسته) انتخاب‌شده برای سیستم، مقدار پسماند ورودی به سیستم را تأمین کند ▪ در برخی موارد سیستم ذخیره‌سازی برای مخلوط کردن پسماند ورودی با زیست‌توده فعال نیز به کار می‌رود.

پیش‌گرمایش	▪ جهت تأمین دمای مناسب فرایند، پیش‌گرمایش پسماند ضروری است. ▪ معمولاً، یک مبدل گرمایی برای انتقال گرما از مواد هضم‌شده خروجی به پسماندهای ورودی، کافی است. ▪ در فرایند ترموفیلیک، به گرمای بیشتری نیاز است و گرمای اضافه برای این منظور، از موتورهای گازی یا از سوختن گاز تأمین می‌شود.
اختلاط زیست‌توده و میکروارگانیسم‌های فعال	▪ بسته به نوع فرایند انتخاب شده، فرایند هضم در یک یا چند راکتور انجام می‌شود. با توجه به سیال بودن زیست‌توده در فرایندهای مرطوب، مخلوط شدن زیست‌توده و میکروارگانیسم‌ها و واکنش‌های فرایند در یک راکتور انجام می‌شود. پسماند ورودی به راکتور ازطریق مکانیکی یا گردش مجدد گاز داخل راکتور، به آرامی با زیست‌توده فعال مخلوط می‌شود. در فرایندهای خشک، که در آن زیست‌توده به شکل دوغاب غلیظ است، جریان داخل راکتور به صورت جریان رو به بالا می‌باشد. در نتیجه، پسماند و زی‌ست‌توده فعال قبل از ورود به راکتور مخلوط می‌شوند. در فرایندهای فازی، که در ارگانیسم‌های متانوژن مانند یک بیوفیلم بر روی مواد حامل قرار گرفته است، تماس بین زیست‌توده و مواد آلی به طور معمول از طریق تلاطم هیدرولیکی در سیستم صورت می‌گیرد و نیازی به مخلوط کردن جداگانه آنها نیست.
سیستم جمع‌آوری گاز	▪ در سیستم‌های مرطوب، گاز در سطح بالایی راکتور جمع می‌شود و می‌توان آن را جمع‌آوری کرد. ▪ در سیستم‌های خشک، ممکن است گاز درون زیست‌توده گیر بیفتد و برای رها شدن و صعود گاز به بالای راکتور، همزدن آرام محصول ضروری است.
تصفیه گاز	▪ ضرورت تصفیه گاز، تا اندازه زیادی به استفاده نهایی از گاز بستگی دارد. ▪ گاز ایجادشده از فرایند هضم معمولاً با آب اشباع شده و محتوای متان آن حدود ٪۶۴ است. به علاوه، این گاز حاوی دی اکسید کربن و مقدار کمی سولفید هیدروژن و آمونیاک نیز هست.
تفکیک مواد هضم‌شده مایع و جامد	▪ در سیستم‌های مرطوب، بخشی از مواد هضم‌شده مایع جهت رقیق‌سازی پسماند ورودی استفاده شده و بخشی دیگر نیز به عنوان مواد هضم‌شده مایع جمع‌آوری می‌شود. ▪ در سیستم‌های خشک، بخشی از ماده باقی‌مانده به عنوان ماده تلقیح برای پسماندهای جدید استفاده می‌شود و بخش دیگر تحت فرایندهای تصفیه بعدی قرار می‌گیرد.
مدیریت مواد هضم‌شده	▪ مدیریت مواد هضم‌شده ممکن است (بسته به استفاده نهایی از مواد هضم‌شده یا دفع آن) نیازمند فرایند تصفیه بیشتر شامل آب‌گیری، تصفیه فاضلاب، تولید کمپوست و ذخیره‌سازی مواد هضم‌شده باشد. مسیرهای اصلی که برای دفع نهایی ارجحیت دارند عبارتند از: ◆ تصفیه مواد هضم‌شده جهت حذف مواد آلی و نیتروژن ◆ سوزاندن یا دفن کردن مواد هضم‌شده خشک بدون تصفیه بیشتر به عنوان گزینه دفع به دلیل مناسب نبودن کیفیت مواد هضم‌شده برای تولید کمپوست ◆ تولید کمپوست و استفاده از آن در زمین، باغبانی و کشاورزی
کنترل بو	▪ پسماندهای خام نباید مدت طولانی به صورت تصفیه‌نشده باقی بمانند و کنترل فرایند برای ثبات شرایط مناسب، ضروری است. ▪ نواحی که مشکل بو دارند، باید از سایر نواحی مجزا شوند تا مقدار هوایی که باید برای کاهش مواد بدبو تهویه شود، کاهش یابد. ▪ محصور کردن منبع ایجاد بو (در بسیاری از موارد، باید پسماندها در یک ساختمان بسته تخلیه و فرایندها تا حد امکان در مخازن بسته انجام شوند و هوای تهویه‌شده این نواحی، تحت تصفیه کامل قرار گیرد) ▪ پنج روش اصلی تصفیه بو عبارتند از: ۱) رقیق‌سازی هوای تهویه‌شده، ۲) فیلترهای بیولوژیکی، ۳) اسکرابرهای شیمیایی، ۴) سوزاندن، ۵) اکسیداسیون کاتالیتیک/ اکسیداسیون و احیا گرمایی

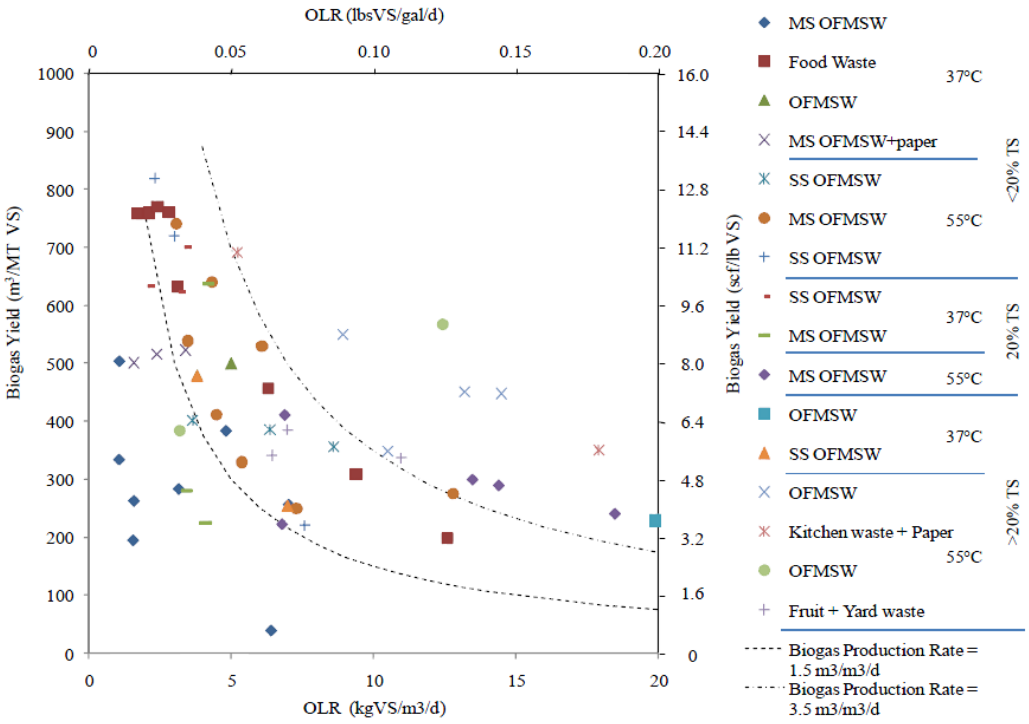
۳-۵- نتیجه‌گیری

- در اوایل دهه ۹۰ میلادی، اغلب هاضم‌های زباله شهری با درصد ماده خشک بالا (هاضم خشک) کار می‌کردند (حدود ۷۰٪ ظرفیت نصب‌شده، "هاضم خشک" بوده است). به استثناء بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ که با ساخت "هاضم‌های تر" بزرگ در اسپانیا همراه بود، "هاضم خشک" همواره بیشترین کاربرد را برای هضم زباله شهری داشته است. در خلال ۵ سال گذشته (منتهی به سال ۲۰۱۴)، ۷۰٪ ظرفیت نصب‌شده مربوط به "هاضم خشک" بوده است. در نتیجه، در کل بازار، سهم "هاضم‌های خشک" زباله شهری حدود ۶۲٪ بوده است [۶۶].
- سیستم‌های "هاضم خشک" (با درصد ماده خشک بالا) در مقایسه با سیستم‌های "هاضم تر" (با درصد ماده خشک پایین) طی ۲۰ سال گذشته ارجحیت داشته است. تا سال ۲۰۰۹، بیش از ۷۰٪ سهم بازار متعلق به "هاضم‌های خشک" بوده است. پیش‌بینی می‌شود طی سالیان آینده به دلیل مزیت‌های اقتصادی و محیط زیستی، این روند به نفع "هاضم‌های خشک" ادامه داشته باشد [۶۷].
- پیش از آن که هاضم بیهوازی به عنوان یک فن‌آوری موجه برای مدیریت پسماند جامد شهری شناخته شود، از "هاضم‌های تر" تک مرحله‌ای برای مدیریت ضایعات کشاورزی و فاضلاب شهری استفاده می‌شد. باید به این نکته توجه داشت که دوغاب حاصل از پسماند شهری رفتار کاملاً متفاوتی با لجن فاضلاب دارد. به دلیل محدودیت‌های زیر، برای مدیریت پسماند شهری، "هاضم خشک" در اروپا نسبت به "هاضم تر" ارجحیت دارد [۲۵]:
  - ماهیت زباله شهری، ناهمگن است و دوغاب حاصل از آن تمایل به لایه لایه شدن و تشکیل لایه کف دارد و در نتیجه، مانع از تجزیه مواد آلی توسط باکتری‌ها می‌شود. در هنگام تخلیه هاضم، لایه کف می‌تواند باعث مسدود شدن لوله‌ها و از کار افتادن پمپ‌ها شود. برای رفع این مشکل، باید با انجام پیش‌پردازش، مواد جامد خنثی را از جریان زباله حذف و زباله را همگن نمود.
  - برای آن که ذرات جامد پیش از خروج از هاضم به صورت کامل تجزیه شوند (عدم شکل‌گیری اتصال کوتاه)، باید اصلاحاتی در طراحی هاضم ایجاد شود تا زمان تماس بین باکتری‌ها و مواد جامد افزایش یابد.
  - پسماند شهری در مقایسه با فاضلاب دارای درصد بالاتری از مواد سمی و مواد بازدارنده است. این مواد به سرعت در در دوغاب رقیق شده و در کل هاضم پخش می‌شوند. اگر غلظت این مواد به حد کافی بالا باشد باعث شوک به میکروارگانیسم‌ها می‌شود. انتشار این مواد در "هاضم خشک" با سرعت پایینتری رخ می‌دهد و در نتیجه، میکروب‌های بیشتری حفظ می‌شوند.



شکل (۳-۲) تشکیل لایه کف در هاضم بی‌هوازی

- "هاضم خشک" (با درصد ماده خشک بالا) برای فرایندهایی که نرخ بارگذاری مواد آلی در آنها بالاتر ($OLR > 6\ kg\ vs / m^3\ d$) است مناسبتر است و برای ($OLR < 6\ kg\ vs / m^3\ d$)، "هاضم تر" (با درصد ماده خشک پایین) پیشنهاد می‌شود [۶۸].
- هزینه تجهیزات فرایندی در فرایندهای "هضم تر" به نسبت بالاتر است [۶۸].
- در فرایندهای "هضم تر" مقدار آب مورد نیاز فرایند در مقایسه با "هاضم خشک" به طرز قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. در حالی که یک سیستم "هضم تر" برای هضم هر تن پسماند آلی (فسادپذیر) شهری نیاز به حدود ۱ متر مکعب آب تازه دارد، این میزان در فرایند "هضم خشک" حدود یک دهم (۱۰٪) می‌باشد. در نتیجه، حجم پساب خروجی از یک "هاضم خشک" چندین برابر کمتر از یک سیستم "هضم تر" می‌باشد. به همین دلیل، در صورتی که تصمیم به استفاده از "هاضم تر" باشد ضرورت دارد در کنار نیروگاه، تأسیسات تصفیه فاضلاب در نظر گرفته شود [۶۸].
- به دلیل آن که سازندگان نیروگاه‌های هاضم زباله شهری در مقیاس صنعتی، تمایل به حفظ اطلاعات عملکردی واحدهای ساخت خود و عدم افشای آن دارند، مقایسه عملکردی این نوع نیروگاه‌ها بر اساس نرخ تولید بیوگاز یا متان دشوار است. اما مطالعات نشان می‌دهد نرخ تولید بیوگاز در اغلب راکتورهای هاضم، در محدوده ($m^3 / m^3\ d$) ۱/۵ تا ۳/۵ قرار دارد [۶۸].
- در نهایت، با در نظر گرفتن جمیع جهات، فن‌آوری "هاضم خشک" به عنوان گزینه نخست در مقایسه با فن‌آوری "هاضم تر" برای مدیریت پسماند آلی شهری پیشنهاد می‌شود.



شکل (۳-۳) بازده بیوگاز بر حسب نرخ بارگذاری مواد آلی [۲۵]

۴- فصل چهارم : فن‌آوری هضم بی‌هوازی مناسب برای فضولات دامی

٤-١- مقدمه

بخش کشاورزی به عنوان مهمترین بخش تولیدکننده مواد غذایی کشور نه تنها مصرف‌کننده انرژی است، بلکه یکی از مهمترین عرضه‌کننده‌های انرژی نیز محسوب می‌شود. نظر به این‌که بخش کشاورزی از یک طرف با محدودیت منابع تولید روبرو بوده و از سوی دیگر، تأمین‌کننده امنیت غذایی جمعیت در حال رشد می‌باشد، باید تعادل و توازنی بین روند برداشت و بهره‌برداری از منابع تولید و تولید محصولات کشاورزی ایجاد شود. در واقع، روند استفاده از منابع تولید باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر رفع نیازهای غذایی نسل کنونی، امنیت غذایی نسل آینده نیز تهدید نشود. این موضوع مبنای آن‌چه را امروزه به آن کشاورزی پایدار گفته می‌شود، تشکیل می‌دهد. استفاده مؤثر از انرژی در بخش کشاورزی نقش اساسی در پایداری تولید، بهینه‌سازی اقتصادی سامانه، حفظ ذخایر سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی هوا دارد.

٤-٢- فضولات دامی

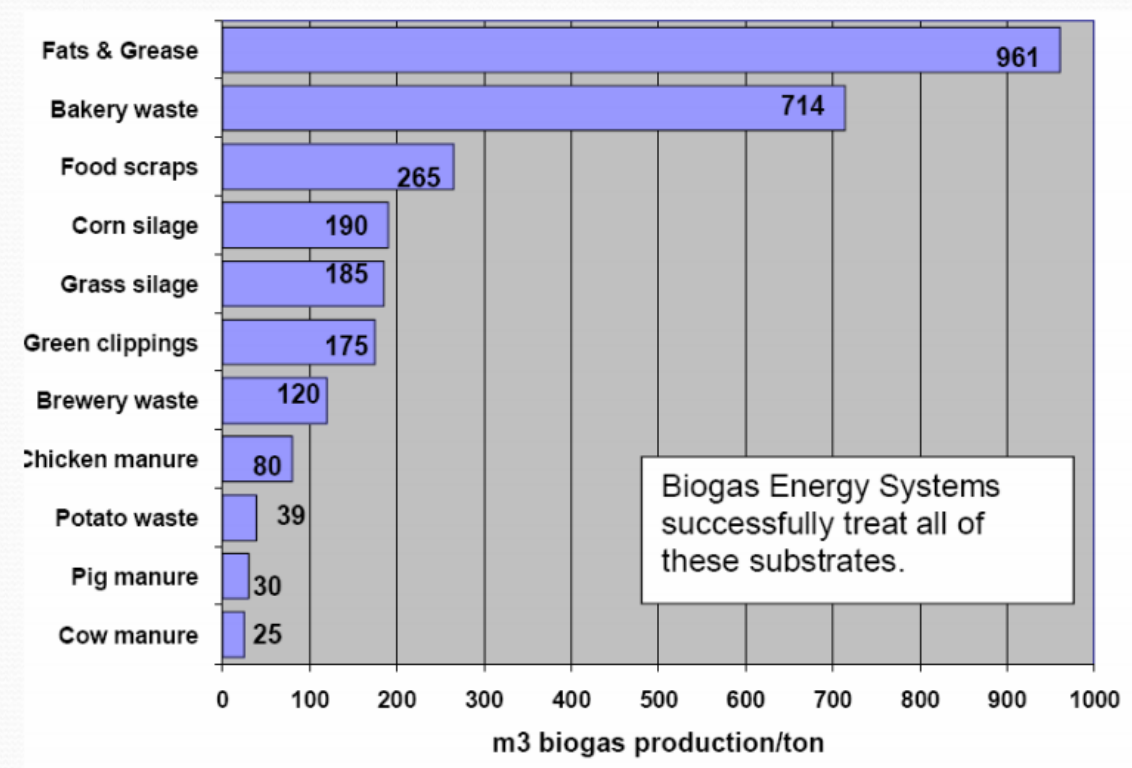
کودهای دامی یک منبع اولیه در دسترس برای پروژه های تولید بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی هستند. کودها اساساً حاوی مواد ریزمغذی و درشت‌مغذی هستند که برای فرایند هضم بی‌هوازی مورد نیاز هستند. کود حاوی مواد جامد فرار است که با تجزیه آن بیوگاز تولید می‌شود. اما کودها نسبت به سایر خوراک‌های آلی قابل هضم، عملکرد بیوگاز کمتری دارند. پتانسیل پایین‌تر کود دام برای تولید بیوگاز به عوامل مختلفی منتسب است که مهمترین آن معده حیوانات است که به عنوان یک هضم‌کننده اولیه در تبدیل خوراک به انرژی عمل می‌کند.

با وجود عملکرد پایین بیوگاز کودی، برای استفاده از آن مزایای بسیاری وجود دارد: ۱) مسأله سیستم‌های مدیریت کود تولیدی می‌باشد. ۲) کودها حاوی باکتری‌های بی‌هوازی هستند که باعث افزایش محتوای باکتری‌های متانوژن در هاضم می‌شود که به ثبات عملکرد دستگاه هضم کمک می‌کند.

فضولات دامی می‌توانند به صورت منفرد یا به‌صورت ترکیبی با زائدات کشاورزی و بقایای گیاهی یا فاضلاب‌های صنایع غذایی, تحت فرآیند هضم بی‌هوازی قرار گیرند. از مواد خروجی از هاضم که دوره هضم را گذرانده‌اند، می‌توان به عنوان کود برای بهسازی و حاصلخیزی خاک استفاده کرد. در اکثر واحدهای کشاورزی برای تخمیر از فضولات دامی استفاده می‌شود. امروزه با افزایش یک نوع ماده خوراکی کمکی (Co-substrate) تولید بیوگاز را تسریع می‌کنند. جدول (۴-۱) مشخصات کود تازه دامی برای تولید بیوگاز را نشان می‌دهد.

جدول)۴-۱(مشخصات کود تازه دامی تولیدی به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم دام زنده [۱۳-۱۴]

نوع دام	کود تولیدی (kg)	چگالی (kg/m^3)	TS (kg)	VS (kg)	BOD (kg)	COD (kg)
گاو	۵۸	۹۸۴	۸/۵	۷/۲	۱/۶	۱۱



شکل (۱-۴) پتانسیل تولید بیوگاز از خوراک‌های متفاوت هاضم

٤-۳- پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی در ایران

کود دامی یکی از مهمترین منابع تولید انرژی می‌باشد که عدم جمع‌آوری آن و پردازش در یک سامانه تولید بیوگاز، منجر به تولید گاز متان طبیعی می‌شود که در اتمسفر منتشر شده و تأثیرات محیط زیستی قابل توجهی از خود به جا می‌گذارد. کیفیت و کمیت کودهای تولیدشده دامی به دلیل شرایط زندگی و تغذیه متفاوت دام‌ها، تنوع بسیاری دارد و این تنوع می‌تواند باعث تغییر در میزان متان تولیدی و همچنین تغییر در ترکیبات بیوگاز تولیدی شود.

با توجه به بررسی‌هایی که در زمینه منابع زیست‌توده صورت گرفته، مشخص گردیده است که حجم زیادی از منابع زیست‌توده در ایران را فضولات دامی و زائدات کشاورزی تشکیل می‌دهند. همچنین، در اولویت‌های اصلی فن‌آوری‌های سازگار با زائدات کشاورزی- جنگلی و فضولات دامی، فرآیندهای هضم بی‌هوازی و از جمله سیستم

بیوگاز می‌باشد. برتری‌های فن‌آوری هضم بی‌هوازی را می‌توان به طور خلاصه تنوع در مواد خام مورد نیاز، سادگی نسبی تجهیزات لازم، ارزان بودن نسبی، تولید فرآورده‌های جانبی باارزش و قابل توسعه در انواع جوامع (کوچک یا بزرگ، روستایی یا شهری یا صنعتی) و کاستی‌های این روش را در نیاز به راهبری دقیق، سرعت پایین تبدیل مواد به انرژی و بازدهی انرژی کمتر نسبت به سایر فن‌آوری‌ها ذکر کرد.
طبق محاسبات و برآورد صورت گرفته در سال ۱۳۷۸ برای ایران، در بخش زائدات کشاورزی و جنگلی، مقدار فضولات حیوانی قابل دسترس در سراسر کشور ۷۴۹۴۶ هزار تن در سال است که بیوگاز قابل تولید از آن ۸۶۶۸ میلیون متر مکعب و انرژی معادل بیوگاز آن ۱۹۳۲۹۹ تراژول می‌باشد. در جدول (۴-۲) جمعیت دام کشور در سال ۹۰ آمده است.

جدول)۴-۲(جمعیت دام کشور در سال ۱۳۹۰

نوع دام	جمعیت دام	حجم فضولات هر راس (تن در سال)
گاو وگوساله اصیل	۱۰۶۰۰۰۰	۲۰۲۵
گاو و گوساله آمیخته	۵۰۰۶۰۰۰	۱۳۵
گاو و گوساله بومی	۲۵۲۲۰۰۰	۹
گوسفند و بره	۵۱۶۹۸۰۱۰	۱/۴۴
بز و بزغاله	۲۵۵۵۱۰۰۰	۰/۹۴۵
گاومیش	۴۸۷۰۰۰	۱۸

٤-٤- جمع‌آوری فضولات دامی

کودهای دامی به دلیل وجود انواع مختلف دام، مواد مورد استفاده برای بستر و روش‌های جمع‌آوری کود متفاوت هستند. کود گاوی برای فرایند هضم بی‌هوازی بسیار مفید است. با این حال، عملکرد بیوگاز آن نسبتاً کم است، زیرا گاوها خود به عنوان هضم‌کننده عمل می‌کنند و کود حاوی لیگنین است که در مقابل هضم مقاومت می‌کند.
معمولاً برای جمع‌آوری کودهای دامی از حجم زیادی آب استفاده می‌کنند. با توجه به حجم آب، کود جمع‌آوری‌شده رقیق است (TS < ۳٪). سیستم‌های اسکرابر یا بر روی وسیله نقلیه مانند تراکتور یا یک دستگاه کراکر مکانیکی سوار می‌شوند. هنگامی که فضولات خطوط را طی می‌کند، به انتها رانده می‌شود که در آن‌جا به یک گودال نگهدارنده منتقل می‌شود. کود جمع‌آوری‌شده به این روش عموماً دارای درصد TS > ۱۰ است. تفاوت زیادی در دو روش جمع‌آوری وجود دارد که متناسب با طراحی جایگاه و مواد بستر است. برای جدا کردن ماسه‌ها قبل از هضم باید تجهیزات جداسازی نصب شود. در حالت ایده‌آل، تمام بسترهای شن با تجهیزات جداسازی جدا می‌شوند (از نظر عملی، همه شن‌ها را نمی‌توان از بین برد که بر عملکرد بیوگاز تأثیر منفی می‌گذارد).

جدول (۴-۳) انواع روش جمع‌آوری کود، درصد رطوبت و نوع فن‌آوری هضم بی‌هوازی را که به طور معمول برای هر یک استفاده می‌شود، نشان می‌دهد.

جدول)۴-۳(روش جمع‌آوری کود، درصد رطوبت و نوع فن‌آوری هضم بی‌هوازی مناسب

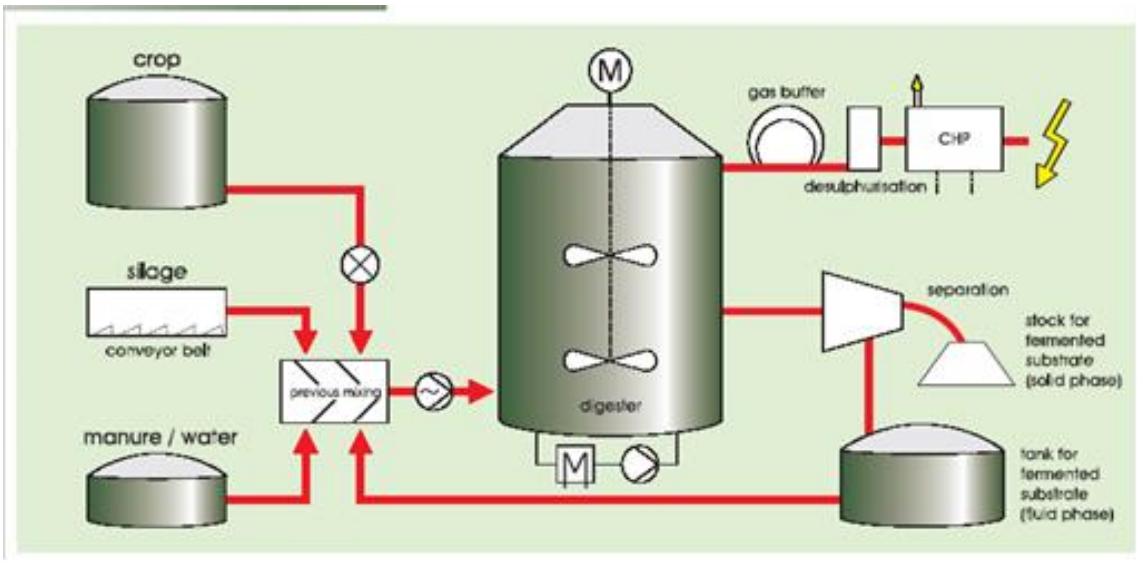
روش جمع‌آوری	TS (%)	نسبت آب به کود	نوع هاضم	
			آب و هوای گرم	آب و هوای سرد
▪ Flush	< ۳٪	۱۰:۱	▪ Covered Lagoon ▪ Complete Mix ▪ Fixed Film ▪ Plug-flow ▪ High Solids AD	▪ Limited possibility for Covered Lagoon as Low TS, high volume of water makes heating difficult ▪ Complete Mix ▪ Fixed Film ▪ Plug-flow ▪ High Solids AD
▪ Scrape & Parlor Wash Water	٪ ۳-۱۳	۱:۱ و ۴:۱		
▪ Scrape - Manure Only	٪ >۱۴	N/A		

نکات مهم برای تولید بیوگاز شامل تازگی و غلظت مواد هضم‌شونده در فضولات دامی می‌باشد. بر اساس تئوری، سیستم‌های جمع‌آوری فضولات از نوع Flushed گاز کمتری را نسبت به سیستم‌های معمول Scraped تولید می‌کند، زیرا مواد هضم‌شونده پخش و آبگین می‌باشند. با این وجود، اگر فضولات حیوانی Scraped پیوسته جمع‌آوری نگردد، فضولات ممکن است تجزیه شده و در مقابل هضم بی‌هوازی ناپایدار شود. تجربه نشان داده که عدم جمع‌آوری پیوسته و وجود مواد زائد غیرآلی در فضولات حیوانی باعث می‌شود، روش Scraped معمولاً انتخاب خوبی برای تولید بیوگاز نباشد.

ذخیره فضولات دامی نیز بر روی تولید بیوگاز اثر دارد. روش‌های ذخیره‌سازی خشک (Drylot storage) بیوگاز کمتری تولید می‌کند، زیرا شرایط هوازی از پیشرفت فعالیت باکتری جلوگیری می‌کند. هضم بی‌هوازی فضولات دامی در لاگون‌ها، بیوگازی غنی از متان تولید می‌کند. اگر لاگون‌ها پوشیده نباشند، بیوگاز به اتمسفر رها می‌شود و زمانی که مواد زائد آبگین هستند، جامدات تمایل به فرو رفتن و تولید یک لایه لجن در پایین لاگون را دارند.

٤-٥- هضم بی‌هوازی کود دامی

یک واحد بیوگاز در واقع یک مخزن تخمیر (یا هاضم بی‌هوازی) ساده است. بر روی مواد آلی ورودی مانند زائدات کشاورزی و فضولات حیوانی که در شکل (۴-۲) نشان داده شده، تخمیر صورت گرفته و از سوی دیگر، گازهای حاصله (از جمله متان) و لجن باقیمانده (که غنی از مواد حاصلخیزکننده خاک مانند N، P، K و ... است) خارج می‌گردند.



شکل (۲-۴) یک نوع واحد بیوگاز برای زائدات کشاورزی و فضولات دامی

اگرچه استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی در اروپا مدت‌هاست به کار گرفته شده است، تقاضا برای هاضم‌های بی‌هوازی برای تصفیه کود دامی، فاضلاب و تولید انرژی رو به افزایش است. عوامل تأثیرگذار بر این تقاضا عبارتند از: قابلیت اطمینان سیستم‌های مستقر در طی سال‌های گذشته، نگرانی روزافزون دولت‌ها، دامداران و مردم در مورد مسائل محیط زیستی و غیره.

بیشتر نیروگاه‌های تولید بیوگاز کشاورزی شامل یک بیوراکتور سیلندری در زیر یا روی زمین با یک هم‌زن چرخان سریع عمودی هستند. سیلندرها یا از بتن یا با عناصری از پیش‌ساخته‌شده از بتن ساخته می‌شوند. برخی از سیلندرها ممکن است شامل ورقه‌های لعابی فولادی، ورقه‌های آهنی تاب‌دار یا ورقه‌های فولادی با عیار بالا باشند. برای مخازن زمینی سقف متحرک، ارتفاع زیاد و قطر مخزن کوچک، ترجیح داده می‌شوند. بیوراکتورهایی که بیرون زمین کار گذاشته می‌شوند، عمدتاً توسط ورقه‌ای مقاوم و هوای فشرده حاصل از فن کوچک حمایت می‌شوند.

واحدهای بیوگاز کوچک و مواردی که میل به توسعه یک لایه شناور یا فرو رونده دارند، مثلاً خوراک با فضولات مرغی اغلب شامل یک مخزن فولادی استوانه‌ای با یک میله هم‌زن افقی هستند. چنین بیوراکتورهایی به‌صورت صنعتی تولید می‌شوند و باید توسط کامیون انتقال یابند که این امر حداکثر حجم آنها را به ۲۸۰ m^3 محدود می‌کند. بیوراکتورهای استوانه‌ای از جنس بتن که به‌صورت افقی قرار می‌گیرند در داخل قابل تولید هستند و لذا می‌توانند بزرگتر باشند. آنها عمدتاً به عنوان تخمیرکننده اولیه به کار می‌روند که بنابراین، خوراک را برای ۲۰-۱۵ روز ذخیره می‌نمایند. در این جا خوراک به کندی به سوی هاضم جریان می‌یابد تا از مخلوط شدن افقی اجتناب نماید. عملکرد راکتورهای تولید بیوگاز از فضولات دامی و پسماندهای گیاهی به دلیل این‌که این مواد همگنی بیشتری در ترکیب شیمیایی داشته و درصد مواد تجزیه‌پذیر در آنها بیشتر است و نیز مواد بازدارنده اندکی در آنها یافت می‌شود بهتر از سایر راکتورها می‌باشد و عمل هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز را آسانتر انجام می‌دهند. اما در شرایط خاص عملکرد این راکتورها می‌تواند مختل گردد. بازده نیروگاه‌های بیوگاز کشاورزی به چگونگی تأسیسات آن بستگی دارد:

- ظرفیت یا اندازه نیروگاه

- میزان برق تولیدشده به‌صورت خودکار
- استانداردهای نصب و میزان خودکار بودن

مراجع

[۱] استحصال انرژی از پسماندهای شهری به روش هاضم (مطالعه موردی: پروژه هاضم منطقه ۴ شهرداری تهران) ۱۳۹۳، سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران.

[۲] الماسی فاطمه. ۱۳۹۱. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد. طراحی و ساخت دستگاه تولید بیوگاز در مقیاس آزمایشگاهی. دانشگاه تهران.

[۳] الماسی مرتضی. اصول تولید و کاربرد بیوانرژی، سازمان انرژی اتمی. ۱۳۶۱.

[۴] حیدری غلامرضا. فن‌آوری‌های مناسب روستایی و انرژی‌های تجدیدپذیر شونده، مرکز تحقیقات روستایی و اقتصادی کشاورزی، ۱۳۶۵.

[۵] دفتر انرژی زیست‌توده سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، ۱۳۹۲. وزارت نیرو.

[۶] سالک محمود. انرژی‌های نو، انتشارات پیدایش، ۱۳۷۸.

[۷] شعبانی کیا اکبر، نظری علی. بررسی جایگاه بیوگاز از نظر زیست

[۸] محیطی و تولید انرژی در ایران، اولین کنفرانس اکولوژی ایران، سال ۱۳۸۳.

[۹] عبدلی م.ع. و و مجلسی م. (۱۳۷۰)،«مدیریت مواد زاید جامد، اصول مهندسی و مباحث مدیریتی»، شهرداری تهران، سازمان بازیافت و تبدیل مواد.

[۱۰] مرکز مطالعات سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران. ۱۳۹۳

[11] Anonymous, 2008. Contractor’s Report. The California Integrated Waste Management Board, Department of Biological and Agricultural Engineering University of California.

[12] Arsova, L., 2010. Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product.

[13] American Society of Agricultural Engineers, (ASAE) .2003.D384.1 FEB03. Manure Production and Characteristics. The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems 2950 Niles Rd,. St. JosepH, MI 490859659, USA pH. 2694290300, hq@asae.org

[14] Barker, J. C., Hodges, S. C., & Walls, F. R. (2002). Livestock manure production rates and nutrient content. North Carolina agricultural chemicals manual.

[15] Baeten, D. and Verstraete, W. (1993) In-reactor anaerobic digestion of MSW-organics. In Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects (eds. Hoitink, H.A.J. and Keener, H.M.), pp. 111-129, Renaissance Publications, Worthington.

[16] Biowaste to Biogas; Fachverband Biogas, July 2019

[17] Boe, K. 2006. Online Monitoring and Control of the Biogas Process, Institute of Environment and Resources, Technical University of Denmark.

[18] Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., Hamdi, M. 2005. Bioreactor performance.

[19] Brand, R. A., 1981. "A company of MBB jointly developed a biogas plant". Scale, 12:35-7.

[20] Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., Forster, C. F. (2002). Continuous Co-Digestion of Cattle Slurry with Fruit and Vegetable Wastes and Chicken Manure. Biomass Bioenergy, 27, 71-77.

[21] Center for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET) Center for Renewable Energy, UK, (1998),Upgrading of Biogas to Natural Gas Quality, Technical Brochure No 154.

[22] Center for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET) Center for Renewable Energy, UK, (1998),Upgrading of Biogas to Natural Gas Quality, Technical Brochure No 154.

[23] Chanakya, H. N., Ramachandra, T. V., Vijayachamundeeswari, M. 2006. Anaerobic Digestion and Reuse of Digested Products of Selected Components of Urban Solid Waste. In: Centre for Ecological Sciences and Centre for Sustainable Technologies Indian Institute of Science.

[24] Chung, P.O., 1973, May. Production and use of methane from animal waste in Taiwan. In Paper presented at International Biomass Energy Conference at Biomass Energt Institute, PO Box 129.

[25] Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste; California Integrated Waste Management Board, March 2008.

[26] De Baere, L. (1999), Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the art. In II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, held in Barcelona, June 15-17, 1999 (eds. J. Mata- Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 1, pp. 290-299, Int. Assoc. Wat. Qual.
[27] Deublein, D. Steinhauser, A. (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources, An introduction. Wiley-VCH: Singapore.
[28] Diaz, L. F., G. M. Savage, and C. G. Golueke (2002) "Composting of Municipal Waste," in G. Tchobanoglous and F. Kreith (Eds.), Solid Waste Handbook, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, Chapter 10.
[29] Dinh PHam Van1, Takeshi Fujiwara, Bach Leu Tho, PHam PHu Song Toan, Giang Hoang Minh; "A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends"; doi.org/10.4491/eer.2018.334; 2019.
[30] Fruteau de Laclos, H., Desbois, S. and Saint-Joly, C. (1997) Anaerobic digestion of municipal solid organic waste: Valorga full-scale plant in Tilburg, The Netherlands. In Proc. 8th Int. Conf. on Anaerobic Dig., held in Sendai, May 25-29, 1997, vol. 2, pp. 232-238, Int. Assoc. Wat. Qual.
[31] Hahn, H, Hoffstede, U.2010." Assessment report on operational experience". From www.biogasmax.eu.
[32] Hartmann, H., and B. K. Ahring. 2006. Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. Wat. Sci. Technol. 53 (8): 7-22.
[33] ISKA Promotional Information. 2006.
[34] Jerger, D.E. and G.T. Tsao. 1987. Feed composition. In: Anaerobic Digestion of Biomass.
[35] Juanga, J. P. 2005. Optimizing Dry Anaerobic Digestion of Organic of Municipal Solid Waste, Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development, Thailand.
[36] Karim, K., R. Varma, M. Vesvikar, and M.H. Al-Dahhan. 2004. Flow pattern visualization of a simulated digester. Water Research. 38: 3659-3670.
[37] Mata-Alvarez, J. 2003: Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes.
[38] Mata-Alvarez, J., Macé, S., Llabrés, P. 2000. Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of Research Achievements and Perspectives. Bioresour. Technol., 74 (1), 3-16.
[39] Munson, Young, Okiishi, Fundamentals of Fluid Mechanics, Section 8.4 (5th edition), John Wiley & Sons, Hoboken (2006).
[40] Nichols, C. E. (2004). "Overview of Anaerobic Digestion Technologies in Europe." Biocycle 45(1): 47-54.
[41] Oleszkiewicz, J.A. and Poggi-Varaldo (1997) High-solids anaerobic digestion of mixed municipal and industrial wastes. J. Environ. Eng. 123: 1087-1092.
[42] Ostrem, K. 2004: Greening Waste: Anaerobic Digestion For Treating The Organic Fraction Of Municipal Solid Wastes. Earth Engineering Center Columbia University.
[43] Pavan, P., Battistoni, P., Cecchi, F., Mata-Alvarez, J. (1999a) Two-pHase anaerobic digestion of source-sorted OFMSW: performance and kinetic study. In II Int. Symp.
[44] RalpH, M. & Dong, G.J.-, 2010. "Environmental Microbiology Second.", A JOHN WILEY& SONS, INC., PUBLICATION.
[45] RIS International Ltd. 2005. Final Report." Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area". Report to SMUD Advanced Renewable and Distributed Generation Program.
[46] Sinclair R. e Kelleher M., 1995. Anaerobic digestion for household organics. BioCycle, 36(4).
[47] Source separated organic materials anaerobic digestion, Feasibility Study Report by Foth Infrastructure and Environment, LCC, 2009.
[48] Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing; ISBN: 978-1-100-21707-9.
[49] Ten Brummeler, E. 2000. Full scale experience with the BIOCEL process. Water Sci. & Technol., 41: 299–304.
[50] Thurm, F. and Schmid, W. (1999) Renewable energy by fermentation of organic waste with the Kompogas process. In II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, held in Barcelona, June 15-17, 1999 (eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 2, pp. 342-3345, Int. Assoc. Wat. Qual.
[51] United Tech, I. (2003). Anaerobic Digestion, UTI Web Design. 2003.
[52] Vlyssides, A. G., and P. K. Karlis. 2004. Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion. Bioresource Technol. 91: 201-206.
[53] Weiland, P. (1992) One- and two-step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues. In Proc. Int. Symp. On Anaerobic Digestion of Solid Waste, held in Venice, 14-17 April, 1992, (eds. F. Cecchi, J. Mata-Alvarez and F.G. Pohland), pp. 193-199, Int. Assoc. on Wat. Poll. Res. and Control.

[54] Weiland, P. (2000) Cofermentation of organic wastes - Concepts, processes and new developments. In Abstr. of the lecture group Environ. Technol., Int. Meeting Chem.Eng., Environ. Protec., Biotechnol., held in Frankfurt am Main, May 2000, pp. 192-194, Dechema, Frankfurt am Main, D.
[55] Wukovits, W., Drljo, A., Hilby, E., & Friedl, A. (2013). Integration of biohydrogen production with heat and power generation from biomass residues. Chem. Eng. Trans, 35, 1003-1008.
[56] Vandevivere, P., De Baere, L., & Verstraete, W. (2003). Types of anaerobic digester for solid wastes. In Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes (pp. 111-140). Iwa Publishing.
[57] U.S. Energy Information Administration, Monthly Energy Review, June 2020
[58] http://www.valorgainternational.fr
[59] http://www.ows.be
[60] http://www.strabag-umwelttechnik.com
[61] http://www.kuettner-uk.com
[62] http://www.bekon.eu
[63] www.pohlsche-heide.de
[64] http://www.axpo-kompogas.ch
[65] http://www.biogasworks.com
[66] “Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe - Status, experience and prospects”; Luc De Baere, Bruno Mattheeuws, January 2012
[67] “High-Solids Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste State of the Art, Outlook in Florida, and Enhancing Methane Yields from Lignocellulosic Wastes”; Gregory Richard Hinds, October 2015
[68] “Comparative technology assessment of anaerobic digestion of organic fraction of MSW”; A. Cesaro, V. Belgiorno & V. Naddeo; University of Salerno via Ponte Don Melillo, Fisciano (SA), Italy

۵- فصل پنجم : مطالعات کتابخانه‌ای

۵-۱- مقدمه

بحران انرژی در کنار بحران دفع زباله به‌عنوان دو مسئله جدی پیش‌روی کشورهای در حال توسعه ازجمله ایران است [۱]. در حال حاضر، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها در زمینه تغییرات آب و هوایی، به‌عنوان مشکلی جهانی که نیاز به توجه ویژه ارگان‌های بین‌المللی دارد، مطرح است. از سوی دیگر، محوطه‌های دفع و مناطق جمع‌آوری پسماند، به موضوعی آزاردهنده برای جامعه کنونی تبدیل شده است. انتشار شیرابه در محوطه‌های دفع زباله، نه‌تنها باعث گسترش بیماری‌های سرطانی می‌شود، بلکه ذخایر آب‌های زیرزمینی را نیز آلوده می‌کند. عدم تفکیک پسماند پیش از دفع آن، دلیل اصلی بروز این مشکل است. دفع سرانه زباله در جهان در حال حاضر ۰/۳۴ کیلوگرم است، که ۴۰ تا ۵۰ درصد آن مواد فسادپذیر و زیست‌تخریب‌پذیر است، و بر اساس انتظارات تا سال ۲۰۳۰، به ۰/۷ کیلوگرم خواهد رسید [۲].

علی‌رغم تولید پیوسته زباله، تجزیه آن به دلیل وجود مواد غیرقابل تجزیه مانند پلاستیک‌ها و رسوبات فلزی با اختلال مواجه می‌شود، که منجر به انباشت زباله و کمبود محوطه‌های تخلیه می‌شود. در ایران، باوجود انواع مختلف پسماند زیستی[1]، ازجمله پسماند شهری، بقایای کشاورزی و فضولات دامی، تلاش‌های حوزه‌های فعال در زمینه احداث واحدهای تولیدی بیوگاز[2] برای مدت‌زمان طولانی در اکثر نقاط کشور به‌درستی اجرا نشده است. دلیل اصلی آن می‌تولند عدم آگاهی در مورد اهمیت تولید انرژی زیستی و پیچیدگی‌های موجود در زمینه تولید این نوع انرژی باشد.

هضم بی‌هوازی (AD)[3] یک تکنولوژی تبدیل مواد فسادپذیر به بیوگاز غنی از متان، از طریق میکروارگانیسم‌ها است [۳]. فرآیند AD به دلیل قابلیت تبدیل انواع مواد اولیه فسادپذیر به سوخت زیستی گازی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که تبدیل حرارتی این مواد با چالش‌هایی نظیر محتوی رطوبت موجود در آن‌ها مواجه می‌شود.

با توجه به پیچیدگی فرآیند هضم بی‌هوازی در حضور صدها نوع جمعیت میکروبی، به‌منظور درک بهتر دینامیک فرایند و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، دسترسی به مدل‌های دینامیکی اهمیت زیادی دارد. چنین مدل‌هایی مبتنی بر تجربیات گذشته و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند. در کنار پیشرفت ابزار و علوم کامپیوتر و توسعه مدل‌های ریاضی، پیش‌بینی رفتار دینامیک فرآیند توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

۵-۲- تجزیه زیستی[4]

[1] Bio-Waste
[2] Biogas
[3] Anaerobic Digestion
[4] Biodegradation

تجزیه زیستی به فرآیند هضم مواد فسادپذیر در حضور میکروارگانیسم‌ها اطلاق می‌شود. به‌طورکلی دو روش تجزیه زیستی شامل هضم هوازی و هضم بی‌هوازی وجود دارد. در فرآیند هضم هوازی مواد فسادپذیر در حضور اکسیژن تجزیه‌شده و در فرآیند هضم بی‌هوازی، تجزیه مواد فسادپذیر در غیاب اکسیژن انجام می‌شود.

۵-۳- هضم بی‌هوازی

۵-۳-۱- مراحل و واکنش‌ها

واکنش کلی تولید متان در فرآیند هضم بی‌هوازی به‌صورت زیر است:

$$C_cH_hO_oN_nS_s + y\ H_2O \rightarrow x\ CH_4 + n\ NH_3 + s\ H_2S + (c-x)\ CO_2$$
$$x = 1/8\ .\ (4c + h - 2o - 3n - 2s) \quad (۵-۱)$$
$$y = 1/4\ .\ (4c + h - 2o - 3n - 2s)$$

این واکنش از قانون توانی زیر در طول زمان پیروی می‌کند:

$$V_{BR} = C_1.\ (1 - e^{-C_2.t_{BR}}) \quad (۵-۲)$$

که در آن VBR (m^3/d) بازده تولید بیوگاز، C_1 و C_2 ثابت و t_{BR} زمان هستند.
در حالت کلی، گاز تولیدی ترکیبی از متان و دی‌اکسید کربن با ترکیب درصد ۷۱ به ۲۹ درصد خواهد بود.
جهت مطالعه دقیق‌تر فرآیند هضم بی‌هوازی، چهار مرحله جداگانه برای این منظور در نظر گرفته می‌شود: هیدرولیز[1]، اسیدزایی[2]، استات‌زایی[3] و متان‌زایی[4]. هر کدام از این مراحل از طریق گروهی از میکروارانیسم‌ها انجام می‌گیرد [۵].

۵-۴- پارامترهای مؤثر بر عملکرد هاضم

۵-۴-۱- دما

بر اساس دماهای عملیاتی، فرآیند هضم بی‌هوازی به سه دسته زیر تقسیم می‌شود:
الف) هضم سرمادوست[5]:

[1] Hydrolysis
[2] Acidogenesis
[3] Acetogenesis
[4] Methanation
[5] Psychrophilic Digestion

دمای عملیاتی در محدوده ۱۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، این نوع فرآیند، ازنظر اقتصادی به‌صرفه و به طور طبیعی در مناطق سردسیری قابل دستیابی است. نرخ هضم بسیار پایین و تولید آرام از مشخصه‌های هضم سرمادوست است.

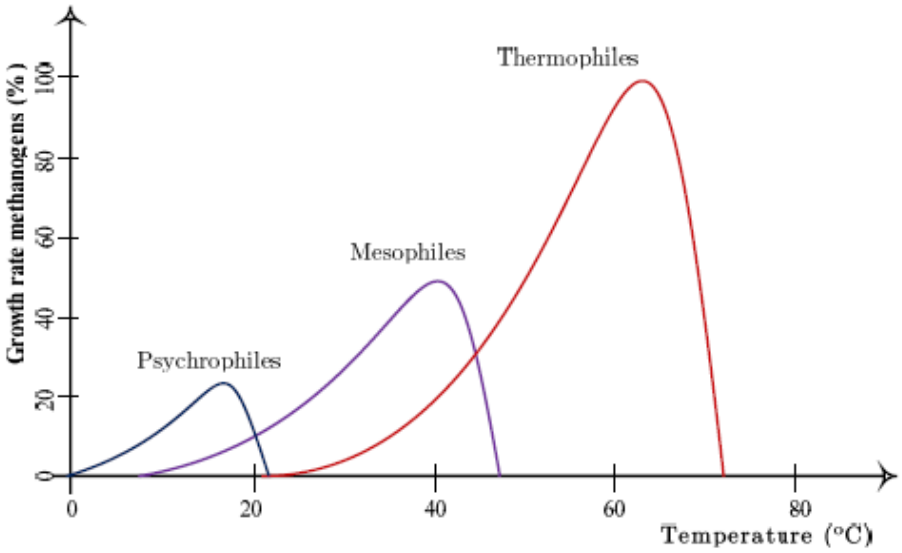
ب) هضم در گستره دمایی معتدل[1]:

این فرآیند در دمای ۳۰ تا ۴۲ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. ازاین‌رو در مناطق با دمای آب‌وهوای معتدل، فرآیندی سازگار بدون نیاز به مبدل حرارتی محسوب می‌شود. حتی درصورتی‌که دمای محیط به زیر این محدوده برسد، ماهیت گرمازای فرآیند هضم بی‌هوازی، دمای فرآیند را با آزادسازی گرما به محدوده عملکرد می‌رساند.

ج) گرمادوست[2]:

این فرآیند در محدوده ۴۸ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. میزان هضم آن بسیار زیاد و فرآیند هضم سریع و ۱.۵ برابر بیشتر از هضم معتدل است [۶]. این فرآیند در زمان ماند کمتر و درنتیجه با ظرفیت بیشتر برای یک راکتور خاص عمل می‌کند. چربی‌ها در این فرآیند به‌خوبی تجزیه‌شده و تنها در مقیاس‌های عملیاتی بزرگ‌تر مقرون‌به‌صرفه است. بازده تولید بیوگاز نیز در فرآیند هضم گرمادوست بیشتر است.

همان‌طور که گفته شد نرخ تولید متان با افزایش دما افزایش می‌یابد. به‌عنوان‌مثال، تولید متان در ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۲۵ درصد پایین‌تر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد بود. ازنظر بهره‌وری انرژی و ازلحاظ اقتصادی، لزوماً این نتیجه به معنای بهینه بودن دمای بالاتر نیست، زیرا دمای هضم بالاتر نیاز به انرژی بیشتری برای دستیابی و حفظ آن دارد.



شکل (۵-۱) نرخ رشد نسبی تولید متان در محدوده دمای مختلف

pH -۲-٤-٥

[1] Mesophilic
[2] Thermophilic

pH نقشی کلیدی در فرآیند تولید متان ایفا می‌کند. محدوده عملیاتی pH از ۶/۷ تا ۷/۵ برای تولید بیوگاز مناسب است [۶]. pH پایین‌تر به‌عنوان یک عامل بازدارنده فعالیت متان‌زایی و منجر به تجمع مواد جامد فرار در داخل هاضم می‌شود. در صورت عدم حساسیت هاضم به pH ورودی پایین، هاضم قابلیت بافربودن در مقابل تغییرات pH را پیدا می‌کند. در فرآیند هضم بی‌هوازی، آمونیاک محلول به‌عنوان یک باز عمل می‌کند و در مقابل دی‌اکسید کربن محلول به شکل اسیدکربنیک نقش اسیدی ایفا می‌کند. تولید متوازن آمونیاک و اسیدکربنیک، هاضم را در محدوده pH خنثی و مناسب برای تولید بهینه متان حفظ می‌کند.

۵-٤-۳- نسبت مواد مغذی C/N/P

نسبت کربن و نیتروژن در حالت محلول در آب نقش مهمی در نرخ تولید گاز و متابولیسم‌های میکروبی دارد. نسبت بالاتر کربن به نیتروژن منجر به کاهش دسترسی به نیتروژن برای تکثیر میکروبی و درنهایت کاهش رشد میکروبی می‌شود، که از این طریق موجب کاهش نرخ تولید و تجزیه خواهد شد. نسبت پایین‌تر کربن به نیتروژن منجر به بازدارندگی آمونیاک در تولید متان می‌شود. نسبت مواد مغذی C : N : P : S = 500-1000 : 15-20 : 5 : 3 یا نسبت ماده فسادپذیر COD : N : P : S = 800 : 5 : 1 : 0.5 برای تولید بهینه متان مناسب است.

۵-٤-٤- فشار

فشار داخل هاضم، یکی دیگر از پارامترهای کلیدی در فرآیند هضم بی‌هوازی است. حلالیت اجزا در فاز مایع به فشار هاضم وابسته است. فشار جزئی بالاتر هیدروژن منجر به بهبود عملیات متان‌زایی و مهار بازدارندگی آمونیاک می‌شود. این واقعیت به دلیل افزایش حلالیت آمونیاک در فاز آبی با افزایش فشار است. با این وجود، این امر موجب افزایش تولید H2S نیز خواهد شد که به‌عنوان یک بازدارنده در فعالیت‌های متان‌زایی عمل می‌کند. وجود مقادیر کم اکسیژن در گاز، منجر به اکسید H2S و تولید SO2 می‌شود. کاهش غلظت H2S در فاز گاز، بهبود فعالیت متان‌زایی را در پی خواهد داشت. فشار عملیاتی مناسب با توجه به عوامل بازدارنده غالب در سیستم، قابل تعیین خواهد بود.

۵-٤-۵- زمان ماند هیدرولیکی (HRT)[1]

زمان ماند هیدرولیکی برابر نسبت حجم فعال هاضم به میزان جریان حجمی ورودی به هاضم تعریف می‌شود. HRT به‌نوعی زمان موردنیاز برای اختلاط کامل در هاضم را جبران می‌کند. HRT بالاتر منجر به هضم کامل می‌شود اما ممکن است ظرفیت و مقیاس عملکرد را کاهش دهد. درصورتی‌که HRT پایین‌تر باعث افزایش اغتشاشات و تغییر پارامترهای عملیاتی مانند pH، دما و ... می‌شود، و بر تولید گاز تأثیر می‌گذارد. باوجوداینکه HRT به نوع و ترکیب درصد خوراک مورداستفاده در هاضم وابسته است، اما در حالت کلی در یک هاضم یک مرحله‌ای با اختلاط مناسب ،

[1] Hydraulic Retention Time (HRT)

HRT حدود ۲۰ روز مطلوب است [۷] و بدون اختلاط، HRT در محدوده ۳۰ تا ۴۰ روز برای تکمیل فرآیند هضم مناسب است. برای یک فرآیند هضم بی‌هوازی دومرحله‌ای، HRT در محدوده ۱۲ تا ۱۵ روز را می‌توان مناسب ارزیابی کرد [۸ و ۹].

۵-٤-٦- میزان بارگیری مواد فسادپذیر (OLR)[1]

میزان بارگیری موادفسادپذیربه‌عنوان جرم (کیلوگرم) مواد جامد فرار ورودی در واحد زمان و در واحد حجم هاضم تعریف می‌شود. OLR در محدوده ۱ تا ۳ کیلوگرم جامد فرار در مترمکعب در روز محدوده عملکرد مناسبی جهت خوراک‌دهی به هاضم است. افزایش OLR به مقادیر بالاتر از ۴ منجر به تجمع VFA و اسیدی شدن هاضم می‌شود. تولید گاز در این حالت بسیار کند شده و تصفیه قلیایی با CaCO3 امکان بازیابی هاضم به حالت عادی را فراهم می‌کند.

۵-٤-۷- قلیائیت[2]

قلیائیت به‌عنوان ظرفیت بافری فاز آبی برای خنثی‌سازی اسیدها تعریف می‌شود و معمولاً معیاری از کربنات‌ها، بی‌کربنات‌ها، هیدروکسیدها و در برخی موارد بورات‌ها، سیلیکات‌ها و فسفات‌ها است. این پارامتر با واحد میلی‌گرم معادل کربنات کلسیم در لیتر بیان می‌شود. محدوده مطلوب قلیائیت در فرآیند هضم بی‌هوازی از ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ برآورد می‌شود.

۵-٤-۸- غلظت میکروارگانیسم‌ها

باکتری‌های هیدرولیز کننده و اسیدساز در مقایسه با میکروارگانیسم‌های متان‌زا، که به دلیل رشد کم زمان ماند در راکتور بین ۱۰ تا ۱۵ روز است، زمان ماند کوتاه‌تری دارند. برای راه‌اندازی کارخانه بیوگاز حدود ۳ ماه زمان لازم است تا باکتری‌های متان‌زا رشد کنند، در غیر این صورت مقدار لجن تلقیح لازم برای بهره‌برداری سریع واحد عمدتاً در دسترس نخواهد بود [۵].

۵-٤-۹- عناصر کم‌مقدار[3]

عناصر کم‌مقدار به دلیل نقش مهمی که در افزایش پایداری دارند به طور گسترده‌ای برای بهبود عملکرد هاضم‌های بی‌هوازی استفاده شده است. علاوه بر این، این روش بهینه‌سازی هضم اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان

[1] Organic Loading Rate
[2] Alkalinity
[3] Trace Element

قرارگرفته است. تجزیه‌وتحلیل محتوی مواد مغذی پسماند مواد خوراکی معمولی نشان داد که اگرچه غالباً حاوی عناصر مغذی برای میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی هستند، بااین‌حال فاقد عناصر کم‌مقدار برای عملکرد موفقیت‌آمیز سیستم هستند [۱۰].

در فرآیند هضم بی‌هوازی در محدوده دمای متوسط با خوراک پسماند مواد خوراکی، افزودن فلزات کمیاب (Co، Mo، Ni، Se و W) می‌تولند تولید متان را بهبود بخشد [۱۱]. مطالعات در این بخش نشان می‌دهد که اگرچه هاضم‌های با دمای متوسط می‌توانند در مدت‌زمان طولانی با غلظت زیاد VFA و آمونیاک بدون از دست دادن قابل‌توجه تولید بیوگاز عملیات هضم را انجام دهند، اما این خطر وجود دارد که این شرایط منجر به شکست ناگهانی شود [۱۲]. در مقابل، در هضم پسماند مواد خوراکی همراه با فلزات کمیاب، تولید متان و pH تقریباً به‌طور مداوم ثابت می‌ماند و غلظت VFA نیز در مقادیر مناسب باقی ماند [۱۳].

۵-۴-۱۰- آمونیاک

در فرآیند هضم بی‌هوازی، آمونیاک عمدتاً از تخمیر پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه و تجزیه متیل آمین و سایر ترکیبات نیتروژنی تولید می‌شود. اگرچه آمونیاک برای رشد باکتریایی ضروری است اما در غلظت‌های بالا (مانند ۳-۶ گرم NH_4^+-N بر لیتر)، برای جامعه باکتری‌ها مضر است. مشکل اصلی تجزیه آمونیوم (NH_4^+) و عدم حذف آن در طول هضم بی‌هوازی است. این امر منجر به غلظت بالای آمونیاک در هاضم می‌شود که ممکن است در اثر کاهش یا توقف تولید متان در بیوگاز باعث شکست فرآیند شود. علاوه بر این، می‌تواند منجر به انتشار آمونیاک هنگام استفاده از هاضم شود. اطلاعات در خصوص مکانیسم مهار آمونیاک محدود است و این نکته دلیل حذف آمونیاک از محصولات هضم بی‌هوازی است و موجب جلب‌توجه بسیاری از محققان شده است. روش‌هایی که تاکنون برای حذف آمونیاک استفاده‌شده است شامل اکسیداسیون بیولوژیکی آمونیاک، نیتروژن زدایی، تبدیل الکتروشیمیایی، فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی مانند رسوب استرویت[۱]، اشعه میکروویو، فرآوری با مافوق صوت، فیلتراسیون غشایی و دفع با هوا است. در میان این روش‌ها، دفع آمونیاک با هوا به دلیل هزینه موردنیاز پایین، pH اولیه پساب هضم بی‌هوازی و پتانسیل در دسترس بودن منبع گرما از احتراق بیوگاز و افزایش نیافتن حجم هاضم هنگام دفع آن، به‌عنوان یک روش عملیاتی مناسب شناخته می‌شود.

۵-۴-۱۱- نتیجه‌گیری پارامترهای مؤثر

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری از این بخش، می‌توان گفت که یک هاضم دومرحله‌ای، یک مرحله برای بخش هیدرولیز و اسیدزایی و مرحله دیگر برای بخش استات‌زایی و متان‌زایی، شرایطی بهینه برای عملکرد میکروارگانیسم‌ها خواهد بود.

[۱] نوعی کانی فلزی با فرمول $NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$

در حالت عادی، به دلیل رشد کندتر و حساسیت بالاتر به پارامترهای محیطی، فراهم کردن شرایط محیطی موردنیاز باکتری‌های متان‌زا از اولویت برخوردار خواهد بود. این در حالی است که عدم وجود شرایط مناسب به‌طورجدی شانس آن‌ها برای زنده ماندن را تحت تأثیر قرار خواهد داد.
لازم به ذکر است که برای سوبسترا پروتئینی، یک هاضم تک‌مرحله‌ای نیز مناسب خواهد بود، چراکه میزان pH بهینه برای هر دو مرحله برای این نوع خوراک، یکسان است [۵].
جدول زیر خلاصه‌ای از پارامترهای موردنیاز جهت عملکرد بهینه هاضم را نشان می‌دهد.

جدول)۵–۱(پارامترهای بهینه پیشنهادی جهت عملکرد مناسب هاضم

پارامتر	هیدرولیز/اسیدزا	استات‌زا/متان‌زا
دما	۲۵ – ۳۵ °C	معتدل: ۳۲ – ۴۲ °C گرمادوست: ۵۰ – ۵۸ °C
pH	۵/۲ – ۶/۳	۶/۷ – ۷/۵
نسبت کربن به نیتروژن	۱۰ – ۴۵	۲۰ – ۳۰
محتوای خشک مواد	< ۴۰٪ مواد خشک	< ۳۰٪ مواد خشک
نسبت C : N : P : S	۳ : ۵ : ۱۵ : ۵۰۰	۳ : ۵ : ۱۵ : ۶۰۰

۵-۵- بیوگاز

بیوگاز مخلوطی از گازهای آزادشده در فرآیند هضم بی‌هوازی مواد زیست‌تخریب‌پذیر تحت عملکرد باکتری‌های FOAB است. در حالت کلی بیوگاز حاوی ۵۰ تا ۷۵ درصد حجمی متان، تا ۲۵ تا ۵۰ درصد دی‌اکسید کربن، ۰ تا ۱۰ درصد نیتروژن، ۰ تا ۱ درصد هیدروژن، و ۰ تا ۳ درصد هیدروژن سولفید است [۶]. جدول زیر خواص بیوگاز را نشان می‌دهد.

جدول)۵–۲(خواص بیوگاز

ردیف	خاصیت	مقدار
۱	محتوی انرژی	۶ – ۶/۵ kWh/m^3
۲	معادل سوخت	۰/۶۵۱ – ۰/۶ نفت (۰/۵۷ LPG) در هر مترمکعب بیوگاز
۳	محدوده انفجار	۱۲ – ۶ ٪ بیوگاز در هوا
۴	نقطه اشتعال	۶۵۰ – ۷۵۰ °C
۵	فشار بحرانی	۷۵ – ۸۹ bar
۶	دمای بحرانی	–۸۲/۵ °C
۷	چگالی	۱/۲ Kg/m^3
۸	بو	بی‌بو در مقادیر کم H2S

جدول)۵-۲(خواص بیوگاز

ردیف	خاصیت	مقدار
۹	بازده احتراق	٪۶۰ در کوره
۱۰	جرم مولکولی مؤثر	۲۰/۱ – ۲۵/۹

۵-۵-۱- کاربردها

کاربردهای بیوگاز شامل سوخت جایگزین چوب، LPG، بنزین و گازوئیل می‌شود. این گاز همچنین به‌عنوان سوخت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، و نیز برای تزریق به شبکه گاز طبیعی قابل کاربرد دارد.

۵-۵-۲- مزایا

فرآیند هضم بی‌هوازی یک تکنولوژی قوی و کارآمد است که می‌تواند آلودگی‌های زیست‌محیطی را در کنار کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، کاهش دهد.
ازنقطه‌نظر عملیاتی، AD فرآیندی با قابلیت تولید لجن کم، مصرف کم انرژی و دارای پتانسیل بازیابی منابع محسوب می‌شود. در مقایسه با سایر فرایندها، هزینه‌های عملیاتی کم، استفاده مجدد از مواد مغذی موجود در پسماند، و امکان تولید پساب عاری از پاتوژن با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصفیه اضافی از مزایای فرآیند هضم بی‌هوازی است. علاوه بر این، بیوگاز تولیدشده در این فرآیند یک انرژی کربن خنثی محسوب می‌شود، به‌طوری‌که انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. در ادامه برخی از موارد برجسته از مزایای تولید بیوگاز ارائه شده است.

- تولید تقویت‌کننده خاک غنی از مواد مغذی و کودفسادپذیربسیار خوب؛
- تعادل چرخه زیست‌محیطی؛
- مزایای میکرو اقتصادی به‌عنوان جایگزین کود و انرژی؛
- منافع اقتصادی کلان از طریق تولید انرژی غیرمتمرکز؛
- کاهش دفن و دفع زباله؛

۵-۶- ترکیب درصد پسماند

۵-۶-۱- پسماند شهری (آشپزخانه‌ای)

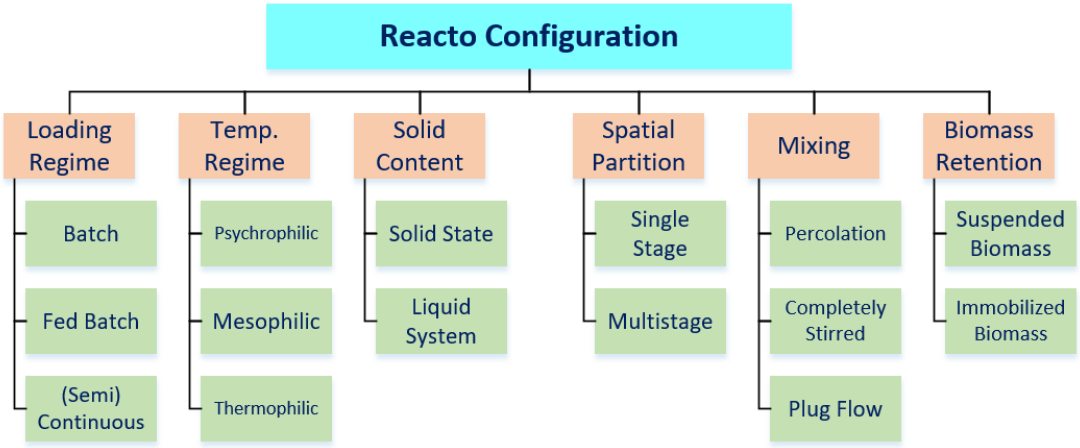
ازآنجایی‌که بیشتر مواد پخته‌شده قابلیت هیدرولیز دارند، پسماند آشپزخانه‌ای پتانسیل بالایی جهت تولید بیوگاز دارد. ازاین‌رو، این نوع پسماندها به راحتی قابل هضم هستند و نیز دارای PH در محدوده اسیدی مناسب برای تغذیه مستقیم به راکتور اسیدزا، پس از اختلاط مناسب با جریان آب فرآیندی، می‌باشند. محتوی معمول پسماند آشپزخانه شامل برنج پخته‌شده در محدوده ۲۳ تا ۵۹٪، غلات در محدوده ۸/۷۶ تا ۱۸/۹۳٪، سبزیجات پخته‌شده از ۵/۶۸ تا ۱۶/۷۲٪، نان از ۱۸/۶۷ تا ۴۱/۹٪ و پسماند سبزیجات در محدوده ۱۷/۴ تا ۲۹/۵٪ می‌باشند [۱۴].

۵-۶-۲- فضولات دامی گاو

فضولات گاو دارای ۸۸ درصد رطوبت و ۱۲ درصد جامد که از این مقدار، ۸۲/۵ درصد آن را جامدات فرار تشکیل می‌دهد، است [۱۵].

۵-۷- راکتورهای مناسب برای هضم بی‌هوازی

ساختارهای گوناگونی برای مهندسی و طراحی راکتورهای فرآیند هضم بی‌هوازی وجود دارد (شکل زیر). هاضم‌ها بسته به نحوه بارگیری، دمای عملیات، محتوی جامد در فاز واکنشی، تقسیم‌بندی مراحل هضم، خواص جریان و اختلاط، زمان ماند زیست‌توده و ... طراحی‌های متفاوتی خواهند داشت. با ترکیب ساختارهای گوناگون در ساخت هاضم‌ها، راکتورهای AD مختلف می‌توانند برای یک کارکرد خاص به کار رفته شوند.



شکل (۵-۲) شماتیک ساختارهای مختلف راکتور AD

انتخاب نوع راکتور در درجه اول بستگی به مشخصات جریان‌های ورودی دارد، که به طور عمده شامل محتوی جامد و فراوانی نسبی نوع جامدات حل‌شده می‌شود. یک تقسیم‌بندی ساده بر این اساس به این صورت است: ۱)

رآکتورهایی که برای هضم پسماندهای محلول طراحی می‌شوند و باید شرایط مناسب برای تولید متان را فراهم کنند؛ و ۲) رآکتورهایی که برای هضم یک نوع خاص از پسماند طراحی می‌شوند و باید شرایط مناسب برای انحلال کارآمد آن پسماند را فراهم کنند.

انتخاب نوع رآکتور، درنهایت بستگی به آنالیز خوراک انتخابی و سایر خواص منحصر به فرد سیستم خواهد داشت. به‌عنوان مثال برای خوراک با رطوبت بالا نظیر فضولات دامی، با در نظر گرفتن سایر جوانب، یک تانک همزن‌دار می‌توان گزینه‌ای مناسب جهت فرآیند AD باشد. جدول زیر تکنولوژی‌های وجود همراه با مزایا و معایب هر کدام از آن‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس رآکتورهای موجود در زمینه AD را می‌توان در سه گروه زیر طبقه‌بندی کرد:

- ساختار رآکتورها (پیوسته یا ناپیوسته)؛
- محتوی جامد (مرطوب یا خشک)؛
- تعداد مراحل (تک‌مرحله‌ای، دومرحله‌ای، یا چندمرحله‌ای)؛

جدول)۵-۳(تکنولوژی‌های هضم بی‌هوازی [۳, ۱۶]

فن‌آوری	اساس	مزایا	معایب	بیشینه OLR ($kg\ COD\ m^{-3}d^{-1}$)
هاضم با نرخ تولید بالا	زیست‌توده از طریق تشکیل گرانول یا اتصال به حامل‌ها در راکتور حفظ می‌شود	▪ OLR بالا؛ ▪ فضای موردنیاز کم‌تر؛ ▪ انعطاف‌پذیر به تغییرات ناگهانی با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری پایین؛ ▪ پساب مقاومت پایین؛	▪ گرفتگی یا اختلال در عملکرد،در صورت وجود ذرات معلق در خوراک؛ ▪ زمان راه‌اندازی طولانی؛	۱۰ – ۱۵
استخر	زمان ماند بالا در تالاب‌های بدون همزن	▪ هزینه سرمایه‌گذاری پایین؛ ▪ تکنولوژی ساده و قوی؛	▪ فضای موردنیاز بالا؛ ▪ اثر گاز زدایی کم؛ ▪ OLR کم؛ ▪ احتیاج به لجن‌زدایی دوره‌ای؛	۰/۱
بی‌هوازی	رقیق‌سازی به ۳ تا ۶٪ و خوراک‌دهی مداوم به یک تانک همزن‌دار	▪ تکنولوژی شناخته شده؛ ▪ تولید پیوسته گاز؛ ▪ درجه کنترل مناسب؛	▪ پساب به شکل مایع و ممکن است نیاز به آبگیری داشته باشد؛ ▪ مصرف زیاد انرژی؛ ▪ مخازن گران‌قیمت؛	۱ – ۳
مخازن	غلظت جامدات ورودی در حدود ۱۵٪	▪ نرخ بارگیری بالا؛ ▪ تولید پیوسته گاز؛	▪ تماس ضعیف بین بستر و زیست‌توده ▪ پساب مایع	۵
همزن‌دار	غلظت جامد بالاتر از ۱۵٪	▪ نرخ بارگیری بسیار بالا؛	▪ تولید گاز غیر یکنواخت است؛	۶ – ۱۰

	سیستم ابتدا بارگیری شده و شیرابه روی بستر جامد گردش می‌یابد.	▪ نیاز پیش‌تصفیه پایین؛ ▪ خروجی هضم جامد؛	▪ بارگیری و تخلیه بستر می‌تواند مشکلاتی در آب‌بندی صحیح راکتورها ایجاد کند؛ ▪ نرخ تبدیل پایین‌تر؛	
جریان پلاگ مایع	غلظت جامد بالاتر از ۱۵٪ و خوراک‌دهی پیوسته، با بازچرخانی شیرابه یا پساب به‌عنوان مایه تلقیح	▪ نرخ بارگیری بسیار بالا؛ ▪ تولید پیوسته گاز؛ ▪ خروجی هضم جامد؛	▪ هزینه سرمایه‌گذاری بالا؛ ▪ سیستم مکانیکی پیچیده؛	۱۰

۵-۷-۱- ساختار راکتورها

در سیستم‌های ناپیوسته، راکتور ابتدا از خوراک بارگیری می‌شود، و در ادامه عملیات بهره‌برداری تا پایان فرآیند ادامه می‌یابد، و درنهایت راکتور خالی شده و دوباره بارگیری می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد. راکتورهای ناپیوسته دارای تکنولوژی ساده و هزینه‌های عملیاتی کم می‌باشند. بااین‌حال، به دلیل ظرفیت بارگیری کمتر نسبت به رآکتورهای پیوسته، به فضای بیشتری نیاز دارند [۱۷]. علاوه بر این، رآکتورهای ناپیوسته اغلب از ناپایداری جمعیت میکروبی متضرر می‌شوند، و ازآنجاکه AD یک فرآیند میکروبی است، بازده فرآیند هضم تحت تأثیر پایداری میکروارگانیسم‌های موجود خواهد بود.در سیستم‌های پیوسته، رآکتورها به طور مداوم از خوراک‌دهی شده و امکان ایجاد یک حالت پایدار در راکتور با بازده ثابت تولید گاز فراهم می‌شود. دو ساختار متداول راکتورهای پیوسته، راکتورهای کاملاً هم زده (محتویات راکتور با همزن مکانیکی یا بازچرخانی پساب یا بیوگاز مخلوط می‌شوند) و راکتورهای جریان پلاگ (محتویات راکتور در امتداد یک راکتور افقی تحت فشار حرکت می‌کنند). اگرچه راکتورهای پیوسته به دلیل نیاز پمپاژ، هزینه‌های عملیاتی بالاتری دارند، بااین‌حال این راکتورها می‌توانند میکروارگانیسم‌ها را در داخل سیستم حفظ کنند، بنابراین از تأخیر مرتبط با رشد میکروارگانیسم‌ها در راکتورهای ناپیوسته جلوگیری می‌شود [۱۸].

۵-۷-۲- محتوای جامد

هاضم‌ها ممکن است با توجه به محتوی مواد جامد (TS) پسماند هضم شده طبقه‌بندی شوند. راکتورهای ناپیوسته می‌توانند به‌عنوان راکتورهای مرطوب (کمتر از ۱۵٪ محتوی جامد) [۱۹] و یا راکتورهای خشک (۲۲-۴۰٪ محتوی جامد) [۱۷] کار کنند. تکنولوژی‌های مرطوب مرسوم شامل رآکتورهای هم زده و جریان پلاگ به ترتیب دارای حداکثر محتوی جامد ۳-۱۰٪ و ۱۰-۱۴٪ هستند [۲۰, ۲۱]. برای پسماند با محتوی جامد بالا ازجمله کود و پسماند شهری، برای حفظ محتوای جامد کمتر از ۱۴٪، ممکن است حجم زیادی از آب برای رقیق‌سازی پسماند موردنیاز باشد، که این باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی با توجه به افزایش حجم رآکتور و افزایش نیازهای گرمایش و پمپاژ می‌شود [۱۷]. بنابراین، اغلب از راکتورهای خشک برای هضم پسماند با محتوی جامد بالا

استفاده می‌شود. راکتورهای خشک فضای کمتری نیاز دارند [۱۷] و اغلب به‌صورت عمودی، با محتوی جامد بالا و جریان پلاگ عمل می‌کنند [۲۲]. هرچند، راکتورهای خشک مرسوم نیز نیاز به انرژی ورودی اضافی برای جابجایی و یا پمپاژ پسماند به رآکتور نسبت به رآکتورهای رقیق و با محتوی جامد کم دارند (به‌عنوان مثال، سیستم‌های جریان پلاگ یا اختلاط کامل با محتوی جامد کم) [۱۷].

۵-۷-۳- تعداد مراحل

هاضم‌ها همچنین می‌توانند به‌عنوان رآکتورهای یک مرحله‌ای، دومرحله‌ای یا چندمرحله‌ای کار کنند. رآکتورهای یک مرحله‌ای ساده‌ترین ساختار رآکتور هستند. در سیستم‌های تک‌مرحله‌ای، تمام فرایندهای هضم در یک راکتور صورت می‌گیرد و این سیستم‌ها از هزینه‌های سرمایه‌ای و هزینه‌های عملیاتی کمتری برخوردار هستند [۲۳]. در مقابل، در راکتورهای دومرحله‌ای فرآیندهای هیدرولیز و اسیدزایی در یک رآکتور و فرآیندهای استات‌زا و متان‌زا در رآکتور دوم انجام می‌گیرد. در مرحله اول، سرعت هیدرولیز مواد سلولزی محدودکننده فرآیند هضم است. مرحله دوم به طور معمول توسط سرعت رشد میکروبی باکتری‌های متان‌زا محدود می‌شود [۱۸]. طراحی‌های دومرحله‌ای امکان بهینه‌سازی جداگانه هر فرآیند را فراهم می‌کند (به‌عنوان مثال زمان ماند بیشتر زیست‌توده در راکتور متان‌زا)، که می‌تولند بازده تولید بیوگاز را افزایش دهد. زیرا باکتری‌های هیدرولیز کننده و متان‌زا دارای شرایط بهینه مختلف هستند [۱۷]. علاوه بر این، این نوع ساختار راکتورها نسبت به رآکتورهای یک مرحله‌ای پایدارتر است [۱۸, ۲۳]، چراکه فرآیند هضم در حالت رآکتور تک‌مرحله‌ای با توجه به تغییرات pH یا تجمع آمونیاک بیشتر در معرض شکست قرار می‌گیرد [۱۸, ۲۲]. به‌عنوان مثال، در یک سیستم دومرحله‌ای، pH می‌تواند قبل از ورود جریان به رآکتور متان‌زا تنظیم شود. علاوه بر این، رآکتورهای چندمرحله‌ای ممکن است برای جدا کردن هر فرآیند (به‌عنوان مثال هیدرولیز، اسیدزایی/ استات‌زایی و متان‌زایی) به کار روند. بر این اساس امکان کنترل بهتر فرآیند و بهینه‌سازی بیشتر هر فرآیند و متعاقباً افزایش بازده تولید متان فراهم خواهد شد.

۶- فصل ششم : مدل‌سازی فرایند هضم بی‌هوازی

٦-١- مقدمه

در کنار روش‌های تجربی و آزمایشـــگاهی جهت دســـتیابی به پارامترهای تأثیرگذار در پایداری فرآیند و بازده تولید بیوگاز، مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند نیز به‌عنوان یک ابزار کارآمد در تعیین و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرآیند هضم بی‌هوازی شناخته می‌شود.
استفاده صحیح از پسماندهای زیستی، مانند استفاده از تکنولوژی هضم بی‌هوازی، اغلب بهترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش برای رفع مشـکلاتی نظیر مدیریت پسـماند تا نشـر گازهای گلخانه‌ای اسـت. اگرچه مدل‌سـازی هرگز نمی‌تواند جایگزین کار تجربی شود، اما یک ابزار کارآمد در پژوهش است و به محققان در رفع برخی ابهامات مربوط با ساختار سیستم کمک می‌کند. همچنین امکان انتخاب منطقی از بین استراتژی‌های تجربی با در نظر گرفتن نتایج حاصل از مدل‌سازی فراهم می‌شود. مدل‌سازی همچنین می‌تواند جهت پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های بی‌هوازی بر اساس موازنه جرم و انرژی و یا برای طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های کنترلی به کار رود.
به‌طورکلی، سه هدف اصلی استفاده از مدل‌سازی شامل موارد زیر است.
۱- درک رفتار سیستم و ارتباط بین اجزاء آن؛
۲- تبیین یا تأیید کمی فرضیه‌ها؛
۳- پیش‌بینی رفتار سیستم در آینده یا تحت شرایط مشابه [۲۴]؛

و هنگامی‌که مدلی معتبر از هضم بی‌هوازی ایجاد شد می‌تواند مزایای زیر را به همراه داشته باشد.
۱- بررسی تأثیر تغییرات پارامترها و شرایط عملیاتی بر عملکرد سیستم؛
۲- شناسایی محدودیت‌های عملیاتی و کنترل زمان واقعی سیستم؛
۳- تعیین شرایط مناسب برای راه‌اندازی سیستم؛
٤- تعیین شرایط بهینه نظیر میزان جریان ورودی و یا شرایط محیطی مناسب و آنالیز حساسیت سیستم؛

مدل‌های ریاضـی قابلیت پیش‌بینی رفتار رآکتور در محدوده وسـیعی از شـرایط عملیاتی و طراحی را دارا می‌باشـند. اسـتفاده از مدل‌های ریاضـی امکان درک مناسـب از یک فرآیند خاص، پیش‌بینی پارامترهای مؤثر، عملکرد فرآیند و بازخورد سـیسـتم در زمان واقعی را فراهم می‌کنند. بر این اسـاس اطمینان از کارآمدی و شـرایط عملیاتی پایدار بر اسـاس نتایج حاصـل از مدل‌سـازی حاصـل می‌شـود [۲۵]. همچنین این مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای فرمولاسیون عملیاتی و استراتژی کنترل سیستم به کار رود. استراتژی کنترلی مناسب می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را کاهش و پایداری و بازده فرآیند را ارتقا دهد.

٦-٢- فرایندهای بیوشیمیایی

واکنش‌های بیوشیمیایی به‌طورمعمول توسط آنزیم‌های داخل یا خارج سلولی تسریع می‌شوند و در بستر مواد فسادپذیر بیولوژیکی عمل می‌کنند. از هم پاشیده شدن کامپوزیت‌ها (مانند زیست‌توده مرده) به ذرات تشکیل‌دهنده و هیدرولیز آن به مونومرهای محلول از طریق آنزیم‌های خارج سلولی انجام می‌گیرد. همچنین تجزیه مواد محلول توسط ارگانیسم‌ها به‌صورت داخل سلولی منجر به رشد زیست‌توده و سپس واپاشی آن می‌شود.
تمایز بین بستر تخریب پذیر موجود و COD ورودی کل بسیار مهم است؛ چراکه کسر قابل‌توجهی از COD ورودی ممکن است قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری از طریق هضم بی‌هوازی را نداشته باشند [۲۶]. معادلات بیوشیمیایی هسته هر مدلی هستند و یک سیستم بی‌هوازی را می‌توان با استفاده از این معادلات نشان داد. بااین‌حال، برای توصیف اثر واکنش‌های بیوشیمیایی بر متغیرهای حالت فیزیکی – شیمیایی
(مانند pH و غلظت گاز)، سازوکارهای فیزیکی–شیمیایی نیز باید در نظر گرفته شوند.
ترکیبات پیچیده موجود در پسماند مانند اجزاء و مواد بی‌اثر محلول ابتدا به کربوهیدرات، پروتئین و لیپید تجزیه می‌شوند. بنابراین مرحله تجزیه شامل مجموعه‌ای از فرآیندها مانند فروپاشی سلولی، پوسیدگی غیر آنزیمی، جداسازی فاز و تجزیه فیزیکی است. همه مراحل بیوشیمیایی خارج سلولی درجه اول فرض شده‌اند که مبتنی بر یک ساده‌سازی است و منعکس‌کننده اثر تجمعی یک فرآیند چندمرحله‌ای است. دو گروه جدا از اسیدوژن‌ها باعث تخریب مونوساکارید و اسیدهای آمینه به مخلوط اسیدهای آلی، هیدروژن و دی‌اکسید کربن می‌شوند. اسیدهای فسادپذیر توسط گروه‌های استوژنیک از اسیدهای چرب بلند زنجیر، بوتیرات، والرات و پروپیونات تشکیل می‌شوند. هیدروژن تولیدشده توسط این ارگانیسم‌ها توسط یک گروه متانوژنیک استفاده کننده هیدروژن و استات مصرف می‌شوند. جذب بستر از نوع سینتیک مونود (کمی متفاوت از سینتیک رشد مونود ASM) به‌عنوان پایه‌ای برای تمام واکنش‌های بیوشیمیایی داخل سلولی است و رشد زیست‌توده هنگام جذب بستر بدیهی است. مرگ زیست‌توده از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند و زیست‌توده مرده در سیستم به‌عنوان ذرات کامپوزیت شناخته می‌شود. توابع بازدارندگی شامل pH (همه گروه‌ها)، هیدروژن (گروه‌های استوژنیک) و آمونیاک آزاد است.

٦-٣- فرایندهای فیزیکی-شیمیایی

این واکنش‌ها ازنظر بیولوژیکی عمل نمی‌کنند و تفکیک یا تجمع یون و جابه‌جایی بین فازی مایع/گاز را در برمی‌گیرد. رسوب‌گرفتگی و ته‌نشینی زیست‌توده در مدل ADM1 در نظر گرفته نمی‌شود. واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی در اینجا به‌عنوان واکنش‌هایی که توسط میکروارگانیسم‌ها انجام نمی‌پذیرند، تعریف می‌شوند و معمولاً در هضم‌کننده‌های بی‌هوازی اتفاق می‌افتند. عمده واکنش‌های فیزیکی – شیمیایی شامل موارد زیر می‌شود؛
۱- واکنش‌های مایع–مایع (تجمع/ تفکیک یونی).
۲- انتقال بین فاز گاز–مایع
۳- تبدیلات مایع–جامد (به‌عنوان مثال؛ رسوبی شدن و محلول سازی یون‌ها؛ متوسط–آرام)

فقط دو نوع فرآیند اول معمولاً در هضم بی‌هوازی مطرح شده‌اند و احتمالاً به این دلیل بوده است که پیاده‌سازی تغییرات جامد مایع دارای دشواری‌های زیادی است. بااین‌حال، واکنش‌های مایع–جامد در سیستم‌های با سطح بالایی

از کاتیون بسیار مهم هستند. به‌خصوص آن‌هایی که به‌راحتی رسوبات کربناتی مانندMg^{+2} وCa^{+2} تشکیل می‌دهند. ازآنجاکه مدل‌سازی رسوب پیچیده است گروه تحقیقاتی IWA تصمیم گرفت که واکنش‌های ته‌نشینی و رسوب گرفتگی را در مدل ADM1 لحاظ نکند [۲۷].

اهمیت سیستم فیزیکی شیمیایی در سیستم‌های هضم بی‌هوازی به دلایل زیر است:

۱- تعدادی از عوامل بازدارندگی بیولوژیکی مانند pH، اسیدهای آزاد، اسیدهای پایه و غلظت گاز حل‌شده را می‌توان بیان کرد؛

۲- متغیرهای عملکردی نظیر جریان گاز و قلیایی بودن وابسته به برآورد صحیح از تحولات فیزیکی-شیمیایی هستند؛

۳- اغلب، کنترل pH با یک اسید یا باز قوی مهم‌ترین پارامتر عملیاتی فرآیند هضم بی‌هوازی است. در این مورد مقدار مقرر کنترل (pH) از حالت فیزیکی شیمیایی محاسبه می‌شود.

۴-۶- مدل ADM1

در راستای شناخت هر چه بیشتر فرآیند هضم بی‌هوازی مدل‌سازی‌های متعددی انجام شده است که از مهم‌ترین و معتبرترین آن‌ها می‌توان به مدل ADM1 اشاره کرد. مدل ADM1 از طریق گروه IWA جهت مدل‌سازی فرآیند هضم بی‌هوازی توسعه یافته است. هدف از این کار فراهم کردن یک مدل ریاضیاتی جامع و کاربردی فرآیند هضم مواد فسادپذیر بود. در ادامه شرح مختصری از نحوه کارکرد مدل و برخی کاربردهای آن ارائه می‌شود.

درحالی‌که مدل‌های اولیه از سینتیک‌های تک‌مرحله‌ای برای محاسبه زیست‌تخریب‌پذیری و جریان گاز در حالت پایدار استفاده می‌کردند، مدل‌های اخیر برای شبیه‌سازی زیست‌تخریب‌پذیری مواد فسادپذیر تحت فرآیندهای بی‌هوازی بر اساس سینتیک‌های چندمرحله‌ای، پیاده‌سازی می‌شود. به طور معمول مرحله نهایی فرآیند هضم بی‌هوازی (متان‌زایی) محدودکننده است و بنابراین مهم‌ترین مرحله در کل روند فرآیند محسوب می‌شود [۲۸]. به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های مدل‌های اولیه، مدل هضم بی‌هوازی ADM1 از طریق همکاری بین‌المللی محققان این حوزه توسعه داده شد. مدل‌های مختلف ازلحاظ ساختاری، اجزای مدل‌سازی و سینتیک‌های فرآیندی بسیار متفاوت هستند که از میان آن‌ها جامع‌ترین مدل، مدل ADM1 است و به دلیل کاربرد گسترده آن توجه روزافزون را به خود جلب کرده است. در جدول زیر برخی از نقاط قوت و ضعف این مدل آورده شده است. در ابتدا از ADM1 برای مدل‌سازی تولید متان در طی فرآیند تخمیر بی‌هوازی لجن فاضلاب استفاده می‌شد، درحالی‌که امروزه به‌عنوان مرجعی مناسب جهت مدل‌سازی طیف گسترده‌ای از فرآیندهای هضم بی‌هوازی با خوراک‌های مختلف استفاده می‌شود [۲۹].

مدل اولیه ADM1 به‌طور هدفمند مکانیسم‌های مختلف یا واسطه را مستثنا می‌کند. محصولاتی که ممکن است در برخی حالات مهم باشند. به‌عنوان مثال، اگرچه فسفر در شبیه‌سازی تصفیه فاضلاب حیاتی است، این جزء در مدل گنجانده نشده است. به همین ترتیب، بازدارندگی توسط H_2S، احیای نیترات و بازدارندگی توسط LCFAs حذف شده‌اند. بااین‌حال مزایای مدل ADM1 نسبت به معایب آن غالب است.

جدول)۶-۱(نقاط قوت و ضعف مدل ADM1

نقاط قوت استفاده از مدل ADM1	مدل ADM1 به‌عنوان یک مدل استاندارد برای هضم بی‌هوازی لجن و پسماند جامد جهت طراحی و شبیه‌سازی فرآیند در حالت پایا و دینامیک شناخته می‌شود [۲۴]. مکانیسم‌های فرآیند به خوبی در این مدل بیان شده و به آسانی قابل توسعه است. ADM1 یک مدل سازگار جهت انجام مطالعات اعتبارسنجی محسوب می‌شود و در زمینه انتقال فن‌آوری از کارهای تحقیقاتی به صنعت قابل اتکا است [۲۷ و ۳۰]. مدل‌های موفقی از سایر قسمت‌های واحد تصفیه فاضلاب با ADM1 ترکیب شده‌اند تا عملکرد کل سیستم را شبیه‌سازی کنند [۳۱]. برای طیف وسیعی از مواد اولیه، شرایط عملیاتی کارآمد است [۲۷].
نقاط ضعف استفاده از مدل ADM1	تعداد زیادی از محققان با موفقیت از ADM1 برای اهداف گوناگون استفاده کرده‌اند که یافته‌های آن‌ها به‌عنوان منابع مفید است [۳۲]. نیاز به تلاش و دانش زیادی برای درک و پیاده‌سازی مدل و نیز نیاز به پارامترهای دقیق بستر برای پیاده‌سازی صحیح است [۳۳]. برخی از ساده‌سازی‌ها در واکنش‌ها ناکافی است. به‌عنوان مثال سینتیک مرتبه اول ممکن است برای توصیف مرحله هیدرولیز مناسب نباشد. ازاین‌رو پیشنهاد شده است که غلظت زیست‌توده، بستر و انواع مواد باید در نظر گرفته شود [۳۴]. به نظر می‌رسد نسخه اصلی ADM1 حاوی برخی از اختلافات در موازنه کربن و نیتروژن باشد [۳۵]. برخی سازوکارها یا مواد واسطه را نادیده گرفته است [۳۲].

۶-۵- توسعه مدل ADM1

۶-۵-۱- مدل ADM1 همراه با مسیر اکسیداسیون استات

مرحله متان‌زایی آخرین مرحله از فرآیند تبدیل مواد فسادپذیر است با دو محصول متان و دی‌اکسیدکربن است. متانوژن‌ها در این مرحله به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند؛ متانوژن‌های تبدیل‌کننده استات یا متانوژن‌های استوکلاستیک[1] و متانوژن‌های مصرف‌–کننده هیدروژن یا متانوژن‌های هیدروژنوتروفیک[2]. بر این اساس، دو مسیر تشکیل متان وجود دارد. در مسیر اول، استات شکسته می‌شود و دی‌اکسیدکربن و متان تولید می‌شوند (متانوژن‌های استوکلاستیک). در مسیر دوم، استات به H_2 و CO_2 اکسید می‌شود، سپس CO_2 با H_2 واکنش داده و CH_4 و

[1] Acetoclastic Methaogens
[2] Hydrogenotrophic Methanogens

H_2O حاصل می‌شود (مسیر اکسیداسیون استات تلفیقی (SAO)[1]). با توجه به اینکه هیدروژن یک دهنده الکترون و دی‌اکسیدکربن یک گیرنده الکترون است، توسط باکتری‌های هیدروژنوتروفیک متان‌زا به متان تبدیل می‌شوند.
اغلب گفته می‌شود که متانوژن‌های استوکلاستیک مهم‌ترین مسیر تولید متان با حدود ۷۰٪ متان تولید شده در هاضم را شامل می‌شود [۵۳]، و مسیر SAO تنها تحت شرایط گرمادوست اهمیت پیدا می‌کند [۵۴]. با این وجود، مطالعات تکمیلی نشان می‌دهد که در محیط‌های با محتوی بالای آمونیاک در شرایط مزوفیلیک، مسیر SAO نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردار خواهد بود [۱۲].
مطالعات بر روی هاضم‌ها نشان می‌دهد که مقادیر بالای آمونیاک منجر به تجمع اسیدهای چرب فرار، و در ادامه کاهش pH و در نهایت توقف عملکرد هاضم خواهد شد. از سوی دیگر فرآیند هضم می‌تواند قبل از ظهور شرایط شکست سیستم به صورت نرمال در مقادیر بالای اسیدهای چرب فرار کار کند (در ابتدا عمدتاً شامل استات است که از طریق خاصیت بافری آمونیاک خنثی می‌شود). همان‌طور که از ماتریس پیترسون دیده می‌شود، دو فرآیندی که منجر به تولید متان می‌شوند شامل جذب استات و جذب هیدروژن می‌باشند. در این شرایط فرآیند جذب استات با نرخ تجمع ρ_{11} که از طریق عامل بازدارنده غلظت TAN کنترل می‌شود (که از طریق غلظت نیمه بازدارنده آمونیاک آزاد در جذب استات، $K_{I,nh3}$ مشخص می‌شود). در این شرایط، که متانوژن‌های استوکلاستیک تحت تأثیر $K_{I,nh3}$ قرار می‌گیرند، مسیر موازی اکسیداسیون استات غالب خواهد بود که در تولید متان تأثیرگذار است [۵۵].
مدل ADM1 جهت در بر گرفتن مسیر اکسیداسیون استات با اضافه کردن دو فرآیند به مدل اولیه توسعه داده شد [۴۸]. این دو فرآیند شامل تخریب استات از طریق یک گروه جدید زیست‌توده اکسیدکننده استات، و زوال این گروه از زیست‌توده است. این دو فرآیند در ماتریس توسعه یافته در پیوست ۱ ارائه شده است (فرآیند 11b و 18b) و مدل توسعه یافته دارای ۲۱ فرآیند تبدیل و ۲۵ جزء است.
یک متغیر حالت جدید به نام زیست‌توده اکسیدکننده استات (X_{ac2}) به مدل ADM1 اصلی اضافه شد. دو نرخ سینتیکی جدید شامل نرخ جذب اکسیدکننده استات و نرخ زوال زیست‌توده اکسیدکننده استات مطابق معادلات زیر به مدل اضافه شده است.

$$\rho_{11b} = k_{m.ac}\frac{S_{ac}}{K_{S.ac2}+1}X_{ac2}I_{11b} \quad (۶-۳)$$

$$\rho_{18b} = k_{dec,Xac2}X_{ac2} \quad (۶-۴)$$

یک معادله ODE برای زوال زیست‌توده اکسیدکننده نیز به مجموعه معادلات اضافه خواهد شد.

$$\frac{dX_{ac2}}{dt} = \frac{q}{V_{liq}}.(X_{ac2.in} - X_{ac2}) + Y_{ac2}\rho_{11b} - \rho_{18b} \quad (۶-۵)$$

با این تغییرات برخی از معادلات اولیه تغییر می‌کنند. تابع بازدارنده I_{11b} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_{11b} = I_{pH.ac2}I_{IN.lim}I_{h2,ac2} \quad (۶-۶)$$

[1] Syntrophic Acetate Oxidation Pathway

که در آن $I_{pH,ac2}$ تابع بازدارنده pH، $I_{IN,lim}$ تابع بازدارنده نیتروژن غیرآلی، و $I_{h2,ac2}$ نیز تابع بازدارنده هیدروژن نسبت به جذب نسبت به جذب اکسیدکننده استات است. این توابع بازدارنده از طریق معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

$$I_{pH,ac2} = \frac{\left(pH_{Lim,ac2}\right)^{k_{ac2}}}{(S_{H^+})^{k_{ac2}} + \left(pH_{Lim,ac2}\right)^{k_{ac2}}} \quad (۶-۷)$$

$$k_{ac2} = \frac{45}{pH_{UL,ac2} - pH_{LL,ac2}} \quad (۶-۸)$$

$$I_{IN.lim} = \frac{1}{1 + \frac{K_{S.IN}}{S_{IN}}} \quad (۶-۹)$$

$$I_{h2.ac2} = \frac{1}{1 + \frac{S_{ac}}{K_{Ih2.ac}}} \quad (۶-۱۰)$$

در معادلات فوق X_{ac2} غلظت جزء زیست‌توده اکسیدکننده استات را نشان می‌دهد. سایر پارامترهای اضافه شده به مدل ناشی از افزودن مسیر اکسیداسیون استات به مدل ADM1 در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول)۶-۲(پارامترهای مربوط به افزودن مسیر جدید SAO به مدل ADM1

پارامتر	شرح	واحد
$k_{m.ac2}$	بیشینه نرخ جذب اکسیدکننده‌های استات	day^{-1}
$K_{dec.Xac2}$	زوال زیست‌توده اکسیدکننده استات	day-1
$K_{S.ac2}$	ضریب نیمه اشباع اکسیدکننده‌های استات	kgCOD m-3
Y_{ac2}	بازده جذب اکسیدکننده‌های استات	kgCOD m-3
$K_{Ih2,ac}$	نیمه غلظت بازدارنده H_2 در جذب استات	kgCOD m-3
$pH_{UL.ac2}$	حد بالای pH برای اکسیداسیون استات	-
$pH_{LL.ac2}$	حد پایین pH برای اکسیداسیون استات	-

۶-۶- اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته ADM1

در این بخش کاربرد مدل ADM1 جهت پیش‌بینی رفتار هاضم با خوراک خمیر چغندرقند (SBP)[1] بررسی شده است. از دلایل انتخاب این کار کامل بودن نتایج و پارامترهای موردنیاز جهت مدل‌سازی این سیستم با استفاده از مدل ADM1 است [۵۶].

[1] Sugar Beet Pulp

فرآیند هضم در شرایط مزوفیل و در دمای ۳۷ $^{\circ}C$ انجام شده است. نرخ بارگیری مواد فسادپذیر (OLR) برابر ($g\ VS\ L^{-1}\ day^{-1}$) ۲، متناظر با زمان ماند هیدرولیکی (HRT) ۱۳۷ روز در نظر گرفته شده است.
برای ورود داده‌های مورد نیاز به مدل ADM1 از مدل تبدیل‌کننده جهت تعیین اجزای ورودی در خوراک استفاده شده است. جدول زیر مشخصات خوراک ورودی به سیستم را نشان می‌دهد که در واقع به عنوان ورودی به مدل تبدیل‌کننده وارد شده است.

جدول)۶-۳(مشخصات خوراک ورودی به مدل تبدیل‌کننده

Components	Unit	Values	Explanations
Total Solids	%WW	24.2	
Volatile Solids	%WW	22.6	VS =93.4% TS
Density of wet food waste	kg m^{-3}	1000	
(1) Particulate COD (CODp)	g m^{-3}	307122	= COD_t - COD_s
(2) CODs - VFA	g m^{-3}	3133.9	
(3) Volatile Fatty Acids (VFA)	g m^{-3}	3133.9	1% of COD_t
(4) Total Organic Carbon (TOC)	gC m^{-3}	101225	= TC - TIC
(5) Total Organic Nitrogen (Norg)	g m^{-3}	3190.8	(TS/VS) % TKN
(6) Total Ammonia Nitrogen	g m^{-3}	289.2	= TKN - Norg
(7) Organic Phosphorus (TP—orthoP)	gP m^{-3}	382.9	(TS/VS) % of TP
(8) Ortho - Phosphate (orthoP)	gP m^{-3}	27.1	= TP – TP-orthoP
(9) Total Inorganic Carbon (TIC)	mole$HCO3^{-}m^{-3}$	172	= (TC - TOC)/12
(10) Total Alkalinity (Scat)	equ m^{-3}	25	
(11) Fixed Solids (FS)	g m^{-3}	16000	= TS - VS

۶-۶-۱- مشخصات خوراک و شرایط اولیه

شرایط اولیه و خوراک ورودی به رآکتور مطابق جدول زیر وارد شده است.

جدول)۶-۴(مشخصات خوراک و شرایط اولیه در مدل ADM1

State	Variable	Units	Input Data	Initial Data
y1	S_{su}	kg COD m-3	3.13	0.00
y2	S_{aa}	kg COD m-3	0.00	0.00
y3	S_{fa}	kg COD m-3	0.00	0.04
y4	S_{va}	kg COD m-3	0.00	0.00
y5	S_{bu}	kg COD m-3	0.00	0.01
y6	S_{pro}	kg COD m-3	0.00	0.01
y7	S_{ac}	kg COD m-3	3.13	0.03
y8	S_{h2}	kg COD m-3	0.00	0.00
y9	S_{ch4}	kg COD m-3	0.00	0.05

جدول)۶-۴(مشخصات خوراک و شرایط اولیه در مدل ADM1

State	Variable	Units	Input Data	Initial Data
y10	S_{IC}	kmole m-3	0.09	0.20
y11	S_{IN}	kmole m-3	0.02	0.08
y12	S_i	kg COD m-3	38.34	44.90
y13	X_c	kg COD m-3	0.00	0.00
y14	X_{ch}	kg COD m-3	235.38	0.23
y15	X_{pr}	kg COD m^{-3}	15.74	0.01
y16	X_{li}	kg COD m^{-3}	1.81	0.00
y17	X_{su}	kg COD m^{-3}	0.00	8.04
y18	X_{aa}	kg COD m^{-3}	0.00	0.37
y19	X_{fa}	kg COD m^{-3}	0.00	0.03
y20	X_{c4}	kg COD m^{-3}	0.00	0.69
y21	X_{pro}	kg COD m^{-3}	0.00	0.81
y22	X_{ac}	kg COD m^{-3}	0.00	2.60
y23	X_{h2}	kg COD m^{-3}	0.00	1.48
y24	X_i	kg COD m^{-3}	15.85	17.57
y25	S_{cat}	kmole cat m^{-3}	0.03	0.02
y26	S_{an}	kmole an m^{-3}	0.08	0.07
y27	S_{va-}	kg COD m^{-3}	0.00	0.00
y28	S_{bu-}	kg COD m^{-3}	0.00	0.01
y29	S_{pro-}	kg COD m^{-3}	0.00	0.01
y30	S_{ac-}	kg COD m^{-3}	0.00	0.03
y31	S_{hco3-}	kmole HCO_3^- m^{-3}	0.00	0.48
y32	S_{nh3}	kmol NH_3 m^{-3}	0.00	0.07
y33	$S_{gas,h2}$	kg COD m^{-3}	0.00	0.00
y34	$S_{gas,ch4}$	kg COD m^{-3}	0.00	1.25
y35	$S_{gas,co2}$	kmol C m-3	0.00	0.02
y36	S_{h+}	kmole H_2 m^{-3}	0.00	0.00
y37	X_{ac2}	kg COD m^{-3}	0.00	2.96

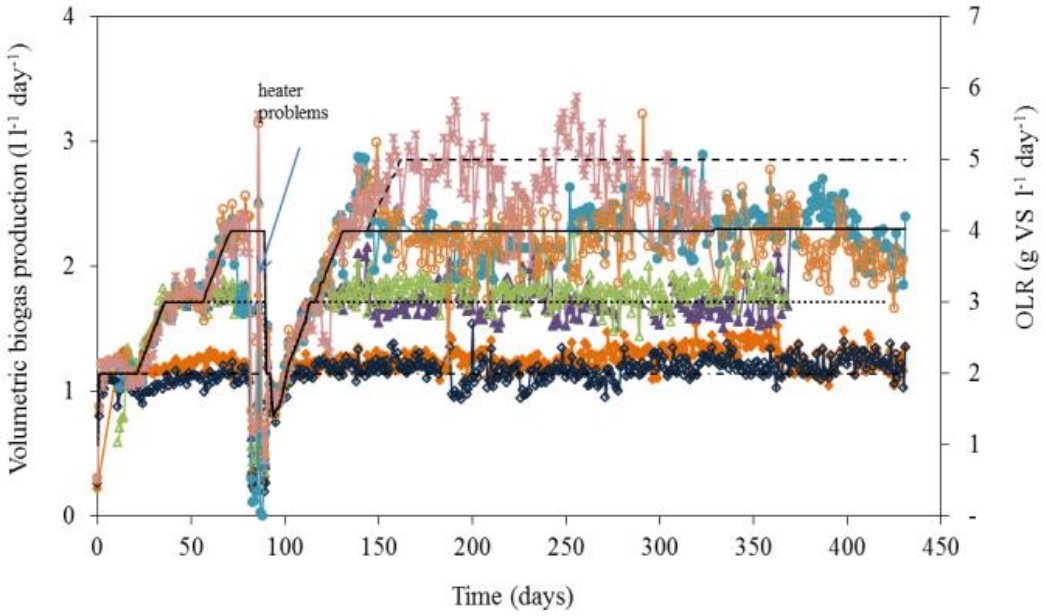
کالیبراسیون پارامترها منجر به شناسایی پارامترهای با بیشترین تأثیر بر نتایج مدل‌سازی خواهد شد. بیشتر پارامترهای مورد استفاده در این مدل مشابه پارامترهای استفاده شده در ADM1 انتخاب شده است. با این حال برخی پارامترها جهت دستیابی به نتایج منطبق بر مقادیر آزمایشگاهی مرتبط با این کار تنظیم شده است که در جدول زیر ارائه شده است.

جدول)۶-۵(مشخصات خوراک و شرایط اولیه در مدل ADM1

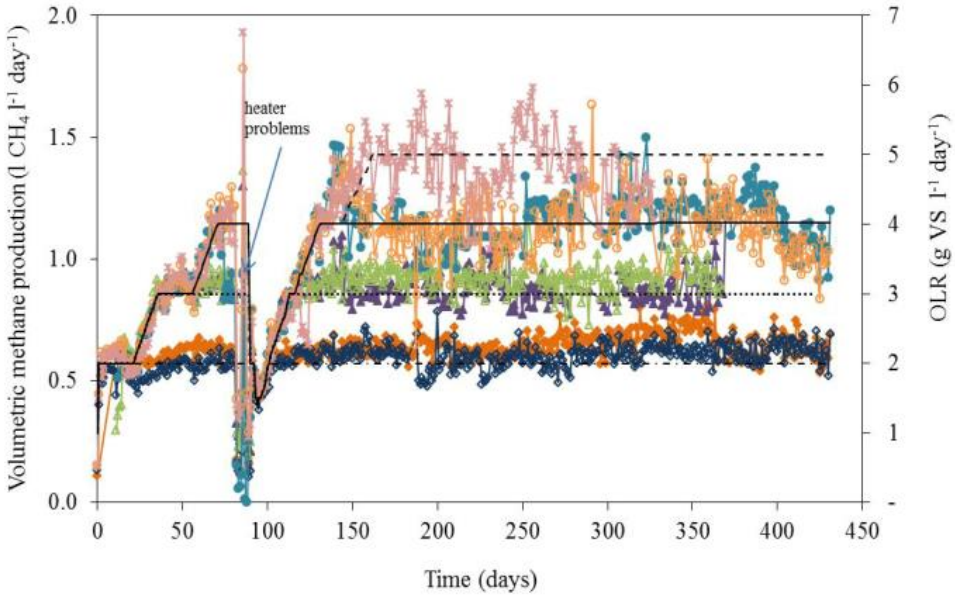
Stoichiometric and kinetic coefficient		Default	used	unit
fsI,Xc	soluble inerts from composites	0.1	0.1248	kgCOD $kgCOD^{-1}$
fxI,Xc	particulate inerts from composites	0.25	0.0516	kgCOD $kgCOD^{-1}$
fch,Xc	carbohydrates from composites	0.2	0.7664	kgCOD $kgCOD^{-1}$
fpr,Xc	proteins from composites	0.2	0.0513	kgCOD $kgCOD^{-1}$
fli,Xc	lipids from composites	0.25	0.0059	kgCOD $kgCOD^{-1}$
Cxc	Carbon content of carbohydrates	0.0313	0.0274	kgCOD $kgCOD^{-1}$
Nxc	Nitrogen content of composites	varies	0.00099	kgCOD $kgCOD^{-1}$
NI	Nitrogen content of inerts	varies	0.00071	kgCOD $kgCOD^{-1}$
Nbac	Nitrogen content of biomass	0.00625	0.09	kgCOD $kgCOD^{-1}$
Ysu	Yield uptake sugars	0.1	0.02	kgCOD $kgCOD^{-1}$
Yc4	Yield uptake butyrates and valerates	0.06	0.15	kgCOD $kgCOD^{-1}$
Yac	Yield uptake acetates	0.05	0.015	kgCOD $kgCOD^{-1}$
Kdis	disintegration rate (first—order)	5	0.5	day^{-1}
Khyd,ch	hydrolysis rate of carbohydrates	10	0.03	day^{-1}
Khyd,pr	hydrolysis rate of proteins	10	0.1	day^{-1}
Khyd,li	hydrolysis rate of lipids	10	0.1	day^{-1}
KI,nh3	inhibitory conc. of NH3 to acetate uptake	0.0018	0.018	kgCOD m^{-1}

٦-٦-٢- نتایج اعتبارسنجی

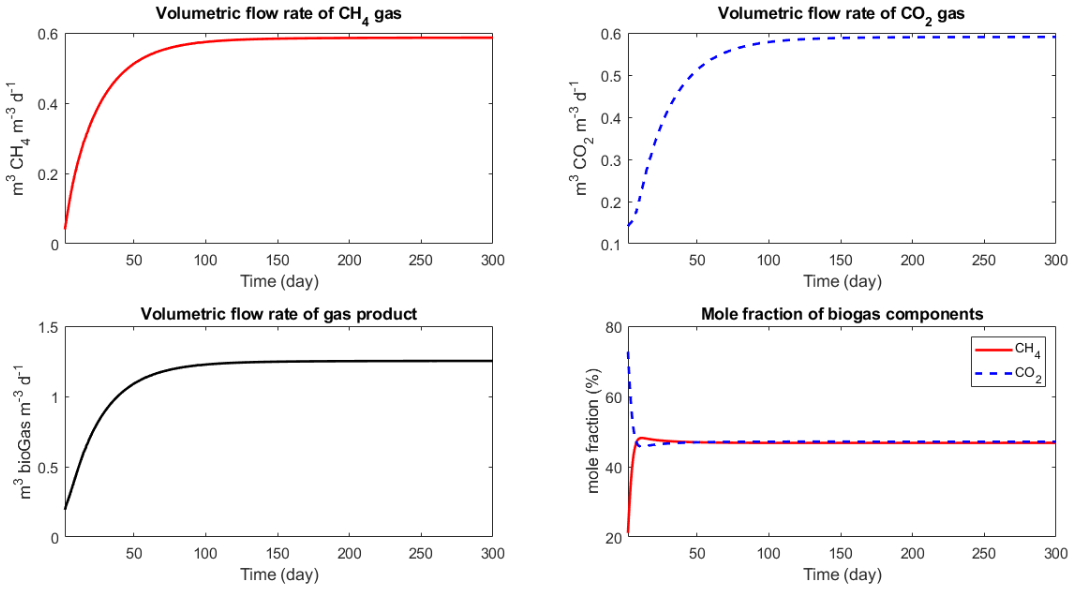
در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مطابق با شرایط فوق مقایسه شده است. شکل زیر میزان متان و بیوگاز تولیدی در شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی را نشان می‌دهد.


Volumetric biogas production (l l-1 day-1)
OLR (g VS l-1 day-1)
heater problems
Time (days)

(الف)


Volumetric methane production (l CH4 l-1 day-1)
OLR (g VS l-1 day-1)
heater problems
Time (days)

(ب)

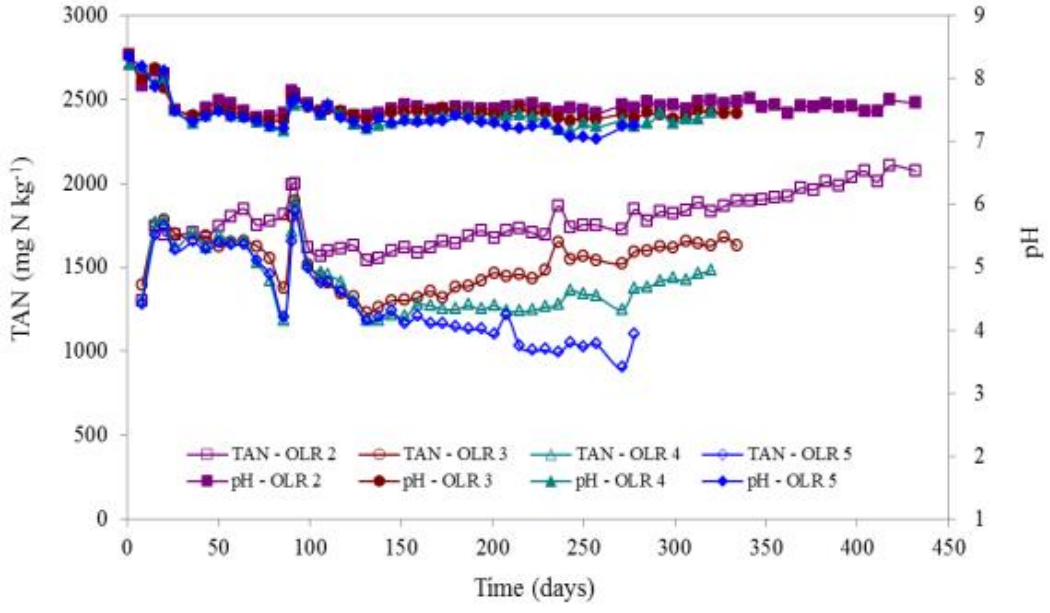


(ج)

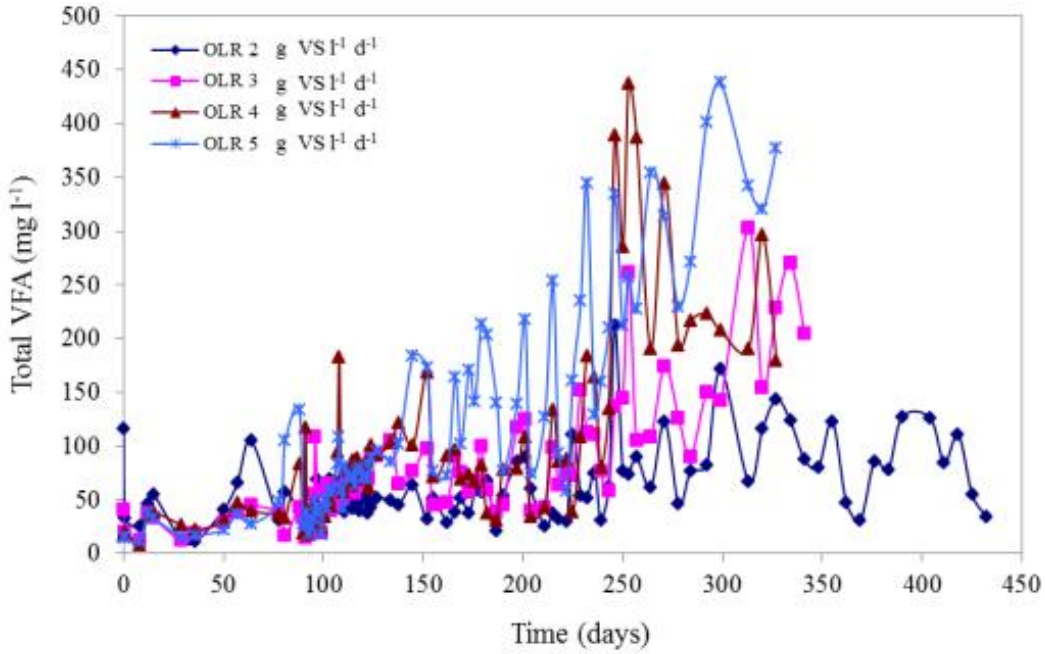
ل (۶-۱) مقایسه نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی برای OLR برابر ۲؛ الف) مقدار بیوگاز تولیدی در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ب) مقدار متان تولیدی در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ج) میزان متان، بیوگاز، دی‌اکسیدکربن و ترکیب درصد بیوگاز حاصل از مدل‌سازی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تولید گاز در شرایط پایا و دینامیک به خوبی پیش‌بینی شده است. هر چند برخی اختلافات در خفته‌های ابتدایی، می‌تواند ناشی از انتخاب نادرست شرایط اولیه و نیز خطاها در تعیین پارامترهای استوکیومتری و سینتیکی برای اجرای مدل باشد.

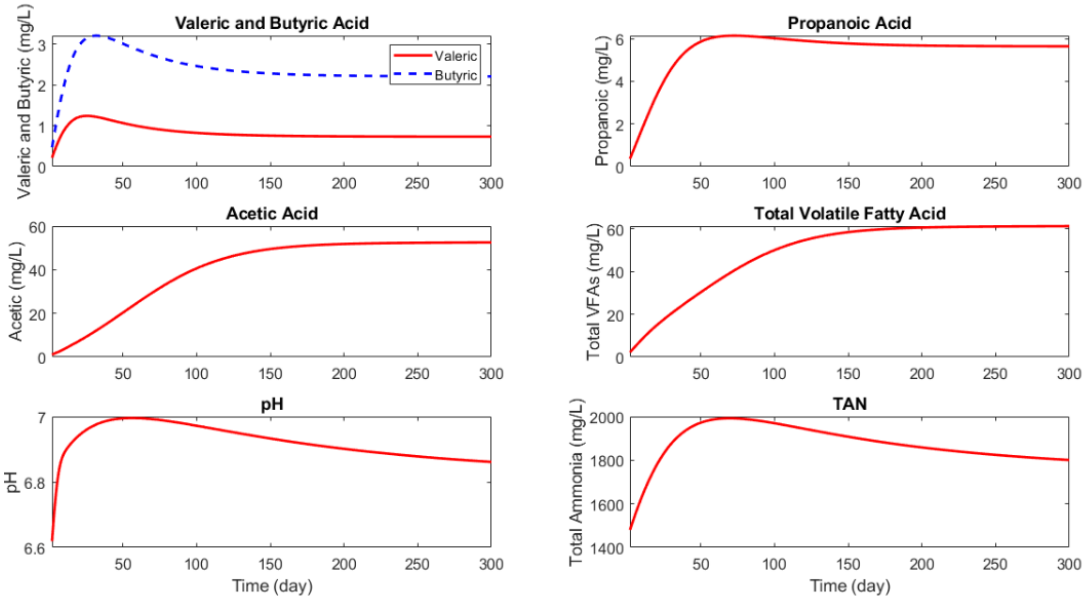
شکل زیر میزان TAN، pH سیستم و میزان اسیدهای چرب فرار در سیستم را در شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

ل (۶-۲) مقایسه نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی برای OLR برابر ۲؛ الف) مقدار TAN و PH در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ب) مقدار اسیدهای چرب فرار در شرایط آزمایشگاهی [۵۶]، ج) مقادیر TAN، PH و اسیدهای چرب فعال حاصل از مدل‌سازی

نمودارهای فوق نشـان‌دهنده عملکرد مناسـب مدل‌سـازی جهت پیش‌بینی متغیرهای اثرگذار در سـیسـتم اسـت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر PH و TAN به خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده‌اند. هر چند برخی اختلافات بین مقادیر اسیدهای چرب فرار پیش‌بینی شده توسط مدل و شرایط آزمایشگاهی وجود دارد، که تا حدی می‌تواند به

دلیل از کار افتادن هیتر در هنگام آزمایش باشد که گزارش شده است و در واقع منجر به ایجاد اغتشاشات در عملکرد سیستم شده است. با این محدوده متوسط اسیدهای چرب فرار با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل همخوانی دارند.

۷- فصل هفتم : فرآیندهای پیش‌تصفیه و ارتقا بیوگاز

۷-۱- پیش‌تصفیه

پسماند فسادپذیر که به عنوان خوراک در فرآیند تولید بیوگاز مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیاز به برخی پیش‌تصفیه‌ها برای سالم‌سازی و جلوگیری از ورود مواد ناخواسته به فرآیند هضم، دارند. موادی که در این فرآیند نامطلوب محسوب می‌شوند، شامل پلاستیک، فلزات، شیشه و برخی دیگر از اجزای غیرقابل تجزیه می‌شوند. انتخاب فناوری پیش‌تصفیه به نوع ماده اولیه‌ای که در فرآیند استفاده می‌شود بستگی دارد. برخی از مواد بیش از سایرین به پیش-تصفیه نیاز دارند، به عنوان مثال پسماند مواد خوراکی در مقایسه با لجن فاضلاب. اشیا و سایر اجزای نامطلوب به طور معمول در طی فرآیند تصفیه فاضلاب، حذف می‌شوند و بنابراین، به جز برخی فرآیندهای ضدعفونی کردن، نیازی به پیش‌تصفیه اضافی نیست. بااین‌حال، پسماند مواد خوراکی حاوی اجزای مزاحم نظیر استخوان، پلاستیک، فلزات می‌باشند که ضرورت فرآیندهای پیش‌تصفیه را نشان می‌دهد.
علاوه بر این به‌منظور افزایش سطح تماس بین مواد فسادپذیر و میکروارگانیسم‌ها، مواد باید به قطعات کوچک‌تر خرد شوند. با اندازه ذرات کوچک‌تر، سطح تماس بیشتر می‌شود و زمان در دسترس جهت تخریب مواد فسادپذیر افزایش می‌یابد. به‌طورکلی فرآیند پیش‌تصفیه می‌تواند مزایای مختلفی را به همراه داشته باشد [۵۷]:

- تسریع فرآیند هضم بی‌هوازی
- افزایش بازده تولید بیوگاز
- امکان استفاده از مواد اولیه جدید
- جلوگیری از مصرف بالای برق مورد نیاز جهت اختلاط

برای پمپاژ بستر (دوغاب مواد اولیه پیش‌تصفیه شده)، محتوای ماده خشک باید کمتر از ۲۰٪ باشد. بنابراین، برای دستیابی به پایداری عملکرد پمپ، نیاز به افزودن آب به بستر جهت ورودی به هاضم است. ماشین‌آلات مورد استفاده در فرآیند پیش‌تصفیه باید بتوانند در برابر سایر اجزای مزاحم مانند پلاستیک، فلزات، منسوجات و غیره مقاومت کنند. بااین‌حال احتمال اتلاف بخشی از پسماند مواد خوراکی در فرآیندهای پیش‌تصفیه وجود دارد.
اثرات پیش‌تصفیه بر زیست‌تخریب‌پذیری بستر بستگی به ویژگی‌های خوراک دارد. به عنوان مثال بسترهای لیگنو-سلولوز نظیر پسماند کشاورزی، کاغذ و پالپ به زمان بیشتری برای هیدرولیز احتیاج دارند که بر زیست‌تخریب-پذیری آن‌ها تأثیرگذار است. از این رو نیاز به روش‌های پیش‌تصفیه پیچیده‌تر همراه با مصرف انرژی بالاتر دارند. اما در مورد مواد فسادپذیر در دسترس مانند پسماند مواد خوراکی و فضولات دامی زمان کمتری جهت هیدرولیز بستر مورد نیاز است.
انواع روش‌های پیش‌تصفیه نظیر روش‌های فیزیکی-شیمیایی، مکانیکی، حرارتی و بیولوژیکی برای پیش‌تصفیه پسماند شهری نظیر پسماند مواد خوراکی مورد مطالعه قرار گرفته است. اهداف اصلی پیش‌تصفیه شامل موارد پیش‌رو هستند: ۱) بهبود خواص سطحی جهت بهبود برهمکنش‌های میکروبی؛ ۲) کاهش و یا حذف اجزای سمی که می‌توانند فرآیند هضم را مختل کنند؛ ۳) بهبود نرخ واکنش‌های هیدرولیز برای پروتئین‌ها و چربی‌ها؛ ۴) افزایش قابلیت تخریب‌پذیری به ترکیبات سخت در دسترس؛ و ۵) فرآوری پسماند فسادپذیر قبل از فرآیند هضم بی‌هوازی، در کنار کاهش اتلاف کربن فسادپذیر در هنگام ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل [۵۸-۶۱]. انواع مختلفی از فناوری‌های

پیش‌تصفیه وجود دارد و بهترین انتخاب برای فناوری نهایی بستگی به نوع خوراک و اندازه واحد دارد. چهار دسته از روش‌های پیش‌تصفیه متداول در ادامه تشریح شده است:

۷-۲- موارد استفاده از بیوگاز و روش‌های ارتقا بیوگاز

۷-۳- ارتقا بیوگاز

همان‌طور که گفته شد، بیوگاز به عنوان یک منبع انرژی، قابلیت استفاده برای تمام کاربردهای گاز طبیعی را دارد. بااین‌حال، متان تنها پتانسیل انرژی بیوگاز محسوب می‌شود. سایر اجزای سازنده شامل حدود ۳۵ درصد دی‌اکسید کربن و مواد نامطلوب (مانند سولفید هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، آمونیاک، سیلوکسان‌ها[1]، رطوبت و ذرات معلق) بی‌فایده هستند و برای برآوردن نیازهای وسایل گازسوز (نظیر موتورهای گازسوز، بویلرها، پیل‌های سوختی، وسایل نقلیه و غیره) و یا رسیدن به استانداردهای گاز طبیعی، در جهت بهبود ارزش انرژی بیوگاز، باید حذف شوند [۷۱, ۷۷, ۸۰, ۸۱].

بیشترین آلاینده‌های قابل‌توجه در بیوگاز شامل سولفید هیدروژن و سایر ترکیبات گوگردی بدبو، نظیر CH_3SH ناشی از تخمیر بی‌هوازی ترکیبات فسادپذیر حاوی گوگرد، هستند [۸۲]. غلظت H_2S در بیوگاز معمولاً از ppm ۳۰- ۱۰ تا ۲۰۰۰-۱۰۰۰ است [۸۳]. علاوه بر بوی بد، این آلاینده می‌تواند منجر به تولید دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و اسید سولفوریک (H_2SO_4) شود که بسیار خورنده، ناسالم و خطرناک برای محیط زیست محسوب می‌شوند [۸۴]. سایر آلاینده‌هایی که در بیوگاز یافت می‌شود شامل ترکیبات هالوژنه، رطوبت و سیلوکسان‌ها، آمونیاک، گردوغبار و ذرات معلق هستند [۷۱, ۸۵]. برخی از این آلاینده‌ها موجب آسیب به اتصالات داخلی ماشین‌آلات و خوردگی لوله-ها خواهند شد [۸۶].

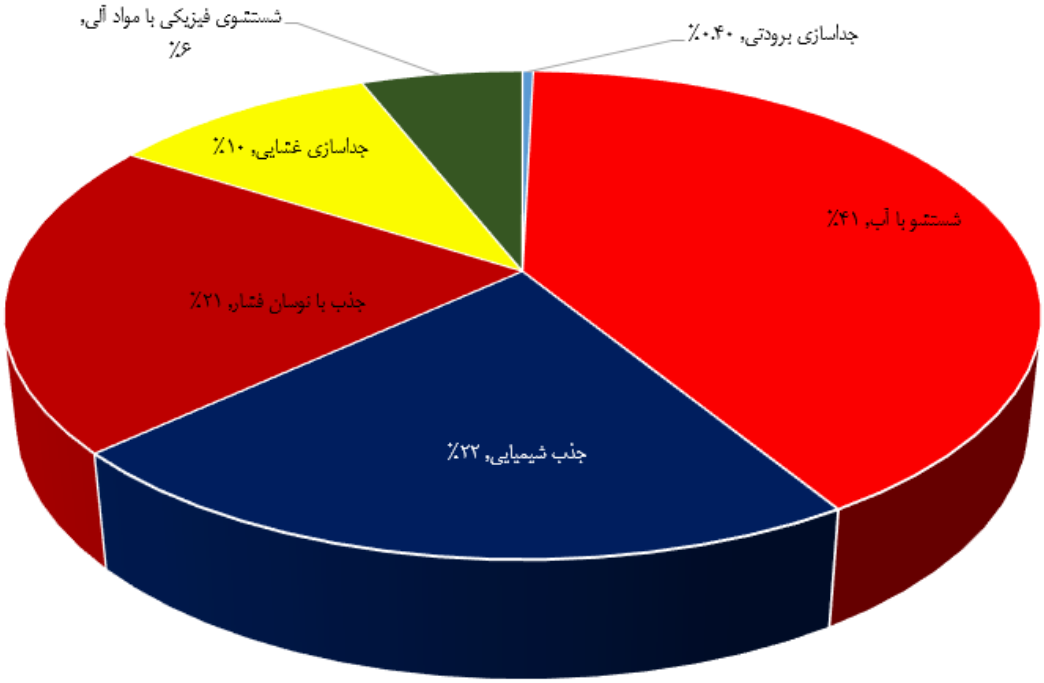
در میان این اجزاء نامطلوب، آمونیاک از نظر خوردگی و خطرات سلامتی در رتبه دوم بعد از سولفید هیدروژن قرار دارد. احتراق بیوگاز حاوی NH_3 می‌تواند منجر به انتشار اکسید نیتروژن (NO_x)، که تأثیر منفی بر محیط زیست خواهد داشت [۸۲]. سایر ترکیبات موجود در بیوگاز (CO_2، H_2O، O_2، N_2، H_2 و غیره) معمولاً بی‌ضرر یا بعضاً مفید تلقی می‌شوند. به عنوان مثال، اکسیژن در فرآیندهای حذف سولفید هیدروژن که از روش‌های اکسیداسیون برای تبدیل S_2^- به گوگرد عنصری (S^0) استفاده می‌کنند، مفید است. سیلوکسان‌ها، گروهی از مولکول‌های حاوی سیلیکون (Si)، نیز گاهی اوقات در بیوگاز وجود دارند. درحالی‌که تحقیقات زیادی در مورد حضور این آلاینده در بیوگاز حاصل از هضم لجن پسماند دفن شده یا فاضلاب انجام شده است، به نظر می‌رسد هیچ مطالعه‌ای در مورد اینکه آیا سیلوکسان‌ها در بیوگاز ناشی از هضم بی‌هوازی پسماند مواد خوراکی وجود دارند، انجام نشده است.

با توجه به مباحث مطرح شده، حذف اجزای نامطلوب برای استفاده نهایی از بیوگاز ضروری است. "فرآیند ارتقا" به معنای حذف دی‌اکسید کربن برای افزایش ارزش حرارتی گاز است که منجر به افزایش محتوی انرژی برای حجم

[1] Siloxanes

خاصی از گاز و نیز حذف سایر ترکیبات آلاینده نامطلوب می‌شود. وقتی آلاینده‌های سمی در گاز وجود دارند و امکان کاهش غلظت آن‌ها تا مقادیر مورد نیاز وجود ندارد، قبل از فرآیند ارتقا باید آن‌ها را حذف کرد تا از خوردگی و سایش مکانیکی تجهیزات ارتقا جلوگیری شود.

تکنولوژی‌های مختلفی جهت ارتقای بیوگاز در مقیاس تجاری در دسترس است، ازجمله: جذب فیزیکی[1] (به عنوان مثال شستشو با آب[2]، جذب با نوسان فشار (PSA)[3]، جذب شیمیایی و فیزیکی (به عنوان مثال شستشو با آمین[4])، فرآیند غشایی و روش‌های برودتی[5] [۷۱، ۸۷ و ۸۸]. سایر روش‌ها در فاز پایلوت و یا نمایشگاهی هستند که شامل روش‌های توسعه‌ای جدید، هم برای تکنیک‌های جدید و هم برای تکنیک‌های متداول، با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی هستند. شکل زیر میزان استفاده از تکنولوژی‌های مختلف جهت ارتقا بیوگاز در واحدهای عملیاتی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۷) شکست تکنولوژی‌های استفاده شده برای ارتقای بیوگاز [۸۹]

فرآیندهای ارتقا موجب افزایش هزینه‌های تولید بیوگاز و نیز انتشار گاز متان همراه با اثرات منفی بر محیط زیست می‌شود. بنابراین، استفاده از یک فرآیند ارتقا بهینه از نظر مصرف انرژی کم و بازده بالا با تولید گاز ارتقا یافته با محتوی بالای متان از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود [۸۷]. علاوه بر این کمینه کردن و یا در صورت امکان جلوگیری از انتشار متان در فرآیند ارتقا، با توجه به این نکته که متان در حدود ۲۰ تا ۳۰ برابر بیشتر از دی‌اکسید کربن دارای اثر گاز گلخانه‌ای است، ضروری به نظر می‌رسد. این بدان معنی است که محتوای متان در گاز دفع شده

[1] Physical Absorption
[2] Water Scrubbing
[3] Pressure Swing Adsorption
[4] Amine Scrubbing
[5] Cryogenic Methods

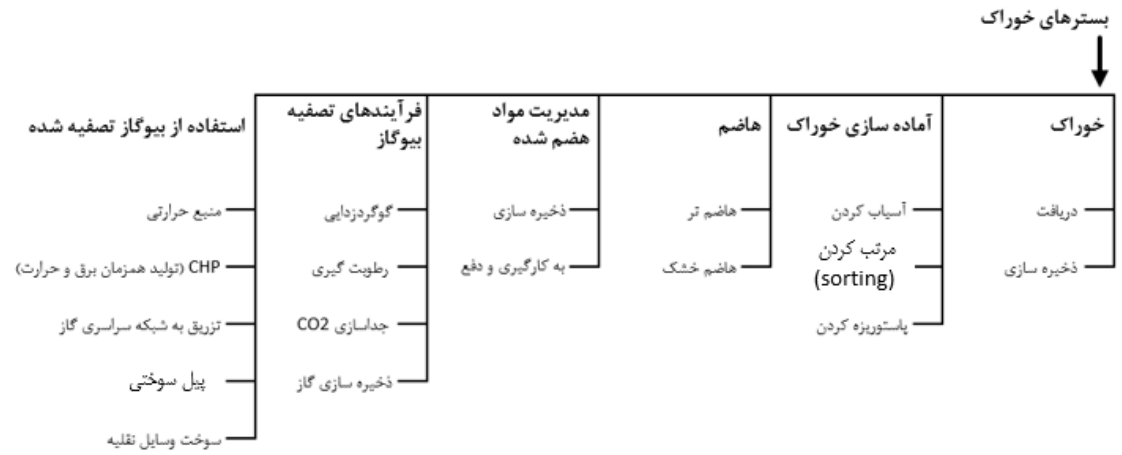
از واحدهای ارتقا باید به حداقل برســد. در ادامه به طور خلاصــه به تکنولوژی‌های موجود در زمینه فرآیندهای ارتقا بیوگاز اشاره شده است.

۸- فصل هشتم : امکان‌سنجی فنی و تخمین هزینه‌های ساخت و راهبری

۸-۱- اجزاء واحد تولید بیوگاز

یک مجتمع تولید بیوگاز متشکل از تجهیزات متنوعی است. نوع و چیدمان این فرآیند به نوع و میزان خوراک مورد استفاده در این واحد بستگی دارد. ازآنجاکه طیف گسترده‌ای از مواد اولیه به عنوان خوراک واحدهای تولید بیوگاز وجود دارند، بر این اساس فناوری‌های مختلفی جهت آماده‌سازی و تصفیه خوراک، و نیز ساختارهای مختلف هاضم و سیستم‌های عملیاتی وجود دارد. علاوه بر این، بسته به نوع، اندازه و شرایط عملیاتی هر واحد بیوگاز، فناوری‌های مختلفی برای ارتقا، ذخیره‌سازی و استفاده از بیوگاز امکان‌پذیر است. به همین ترتیب، برای ذخیره‌سازی و استفاده از مواد هضم‌شده، استفاده از آن به عنوان کود زیستی با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی از اولویت برخوردار خواهد بود.

مراحل اصلی فرآیند تولید بیوگاز در شکل زیر ارائه شده است. هاضم‌های خشک و تر فقط از لحاظ تئوری متفاوت هستند، چرا که فرآیندهای میکروبیولوژیکی همواره در فاز سیال صورت می‌گیرد. مرز بین هاضم خشک و تر بر اساس "قابلیت پمپاژ" مواد اولیه تعیین می‌شود. محتوای مواد جامد بالای ۱۵٪ به این معنی است که ماده "قابل پمپ" نیست و هاضم در این حالت به عنوان هاضم خشک تعریف می‌شود.



شکل (۸-۱) مراحل اصلی فرآیند تولید و استفاده از بیوگاز [۹۷]

انتخاب نوع و طراحی واحد تولید بیوگاز به میزان و نوع خوراک در دسترس بستگی دارد. میزان خوراک تعیین‌کننده اندازه هاضم، ظرفیت‌های ذخیره‌سازی و اندازه CHP خواهد بود. همچنین نوع و کیفیت خوراک (محتوای مواد جامد، ساختار، منبع و ...) تعیین‌کننده فناوری مورد استفاده است. بسته به اجزاء موجود در مواد اولیه، ممکن است نیاز به جداسازی مواد نامطلوب، خرد کردن و یا اضافه کردن آب جهت تبدیل آن به مواد قابل پمپ باشد.

مواد هضم شده خروجی از هاضم به مخازن ذخیره‌سازی پمپ می‌شوند. این مخازن باید با پوشش‌های از نوع غشای گازبند[1] تجهیز شوند تا امکان جمع‌آوری بیوگاز تولیدی در این مخازن، در دمای محیط (پس از هضم) فراهم شود. به

[1] Gas Proof Membrane

عنوان جایگزین، مواد هضم‌شده را می‌توان در مخازن روباز مجهز به سقف شناور نیز، با هدف کمینه کردن انتشارات، ذخیره کرد [۹۷].

بیوگاز تولیدشده در فرآیند بعد از ذخیره‌سازی و تصفیه برای تولید انرژی استفاده می‌شود. متداول‌ترین کاربرد بیوگاز، استفاده از آن برای تولید هم‌زمان برق و حرارت در واحد CHP است. در ادامه اجزاء در نظر گرفته‌شده در طراحی مفهومی یک واحد تولید بیوگاز بر اساس خوراک پسماندهای شهری ارائه شده است. به‌طور کلی اجزاء اصلی و تجهیزات در نظر گرفته شده برای هر بخش جهت محاسبات تخمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل موارد زیر است:

۱- واحد پیش‌تصفیه؛
۲- واحد هاضم؛
۳- واحد مدیریت مواد هضم شده: شامل تجهیزات آب‌زدایی (پرس تسمه‌ای[1]) و پمپ‌های مورد نیاز؛
٤- واحد تصفیه بیوگاز خام: شامل بسترهای جاذب اکسید آهن و کربن فعال به همراه یک خنک‌کن و جداکننده آب؛
٥- واحد تولید هم‌زمان برق و گرما (CHP): شامل دمنده هوا، کمپرسور و توربین‌های مورد نیاز، محفظه احتراق، تجهیزات بازیابی حرارتی و نیز تجهیزات مکانیکی مورد نیاز؛
٦- واحد فلر: شامل درام جداکننده مایع[2]، پمپ مورد نیاز، دودکش و نوک فلر[3]؛

در ادامه امکان‌سنجی فنی و برآورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری مربوط به دو نوع خوراک پسماند شهری و فضولات دامی ارائه شده است. خوراک در نظر گرفته شده برای هر بخش مطابق جدول زیر در نظر گرفته شده است. مشخصات خوراک در نظر گرفته شده برای محاسبات فوق بر اساس داده‌های موجود در مقالات در نظر گرفته شده است. ازاین‌رو، جهت محاسبات دقیق‌تر نیاز به مشخصات خوراک واقعی بر اساس آنالیزهای فصلی از خوراک موردنظر خواهد بود.

جدول)۸-۱(مشخصات خوراک مورد استفاده در تخمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری [۹۸, ۹۹]

نوع خوراک	ظرفیت خوراک (Ton/day)	محتوای جامد (TS%)	محتوای جامد فرار (VS%)	پتانسیل تولید متان (Nm^3 CH_4/Ton VS)
پسماند شهری	۲۵۰	۳۳	۲۲/۶	۳۴۰
فضولات دامی (گاو)	۲۵۰	۳۱	۲۳/۵	۱۱۰

۸-۲- واحد پیش‌تصفیه بر اساس خوراک پسماند شهری

۸-۲-۱- واحد دریافت خوراک

[1] Belt Press
[2] Knockout Drum
[3] Flare Tip

تأمین و حمل مواد اولیه نقش مهمی در بهره‌برداری از واحدهای تولید بیوگاز دارد. اطمینان از تأمین پایدار و مداوم مواد اولیه، با کیفیت و مقدار مناسب، از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به تغییر کیفیت خوراک پسماند شهری، مدیریت کیفیت (مهندسی) خوراک جهت بررسی و ارزیابی کیفی و کمی ضروری به نظر می‌رسد. در اولین قدم، کنترل بصری مواد اولیه کاملاً ضروری است. در ادامه، وزن تحویل و کلیه داده‌های مربوط به مواد اولیه (تأمین‌کننده، مقدار، نوع و کیفیت مواد اولیه) باید ثبت شود.

۸-۲-۲- ذخیره‌سازی خوراک

ذخیره‌سازی خوراک در درجه اول برای جبران نوسانات فصلی تأمین مواد اولیه است. علاوه بر این امکان اختلاط خوراک‌های مختلف از این طریق تسهیل می‌شود. نوع تأسیسات ذخیره‌سازی به ماده اولیه مصرفی بستگی دارد. تأسیسات ذخیره‌سازی را می‌توان به‌طور عمده به سیلوهای ذخیره مواد اولیه جامد (به عنوان مثال سیلوی ذرت یا پسماند شهری) و مخازن ذخیره مواد اولیه مایع (به عنوان مثال کود مایع و خوراک‌های دوغابی) طبقه‌بندی کرد. به‌طور کلی، ظرفیت سیلوها بیش از یک سال ذخیره مواد جامد و ظرفیت مخازن ذخیره در حدود چند روز در نظر گرفته می‌شوند. ظرفیت تأسیسات ذخیره‌سازی بر اساس میزان ذخیره مورد نیاز، فواصل تحویل و میزان خوراک‌دهی روزانه به هاضم تعیین می‌شود.

۸-۲-۳- آماده‌سازی خوراک

آماده‌سازی خوراک بر جریان و بازده فرآیند هضم مؤثر است. هدف اصلی آماده‌سازی حذف مواد آلاینده و نامطلوب و نیز بهبود عملکرد هاضم می‌باشد. تصفیه خوراک پتانسیل قابل توجهی در بهینه‌سازی فرآیند، افزایش نرخ هضم و بازده تولید بیوگاز دارد. گزینه‌های مختلفی برای پیش‌تصفیه خوراک وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به خردکردن مکانیکی، فرآیندهای تجزیه، هیدرولیز و غیره اشاره کرد.

۸-۲-٤- سیستم خوراک‌دهی

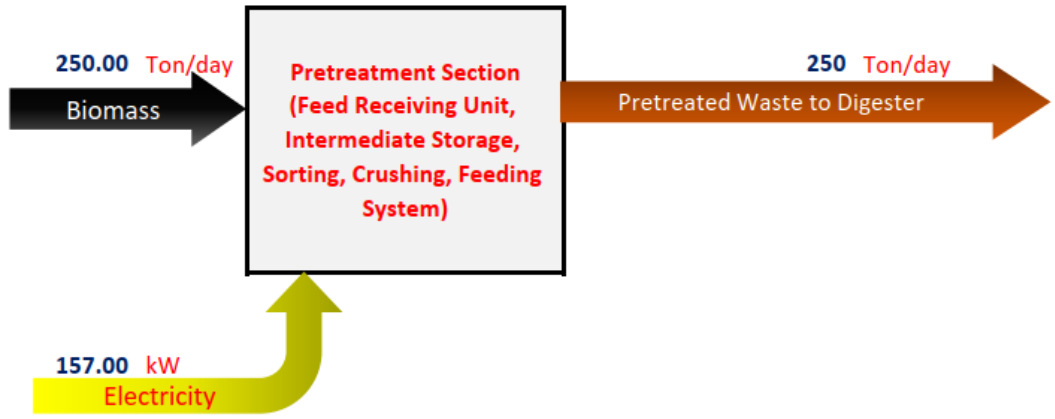
مواد اولیه بعد از ذخیره‌سازی و پیش‌تصفیه، به عنوان خوراک وارد هاضم می‌شود. تکنیک خوراک‌دهی بسته به نوع خوراک و قابلیت پمپاژ آن متفاوت است. خوراک قابل پمپ از مخازن ذخیره به هاضم پمپ می‌شود. این در حالی است که مواد غیرقابل پمپ را می‌توان از طریق یک بارگیر به سیستم تغذیه منتقل و سپس به عنوان خوراک به هاضم وارد کرد. با توجه به خوراک غیرقابل پمپ پسماند شهری، خوارک‌دهی بستر پیش‌تصفیه‌شده، با استفاده از یک نوار نقاله پیچشی[1] انجام می‌شود. جهت اطمینان از همگن‌بودن و یکنواخت بودن محتوای مواد جامد خوراک، رطوبت‌دهی خوراک نیز همزمان با خوراک‌دهی انجام می‌شود. برای انجام این کار، مایع حاصل از سیستم آب‌گیری،

[1] Plug Screw Conveyer

یا آب تازه از یک مخزن اضافه تأمین می‌شود. علاوه بر این، جهت آغاز سریع فرآیند هضم، تلقیح بستر از طریق بازگرداندن مواد هضم‌شده خروجی از هاضم صورت می‌گیرد.
با توجه به خوراک مورد استفاده در این بخش (پسماند شهری)، سیستم دریافت خوراک، ذخیره‌سازی و پیش‌تصفیه آن و در نهایت، سیستم خوراک‌دهی شامل تجهیزات زیر می‌باشد. لازم به ذکر است مواد نامطلوب موجود در خوراک پیش از ورود به مخزن ذخیره از طریق هر یک از روش‌های مکانیکی، مغناطیسی و یا دستی بسته به نوع خوراک دریافتی، جداسازی می‌شوند [۹۷].

- واحد دریافت خوراک؛
- سیلوهای میانی جهت ذخیره‌سازی خوراک
- مرتب‌کردن و خردکردن خوراک جهت تأمین خوراک با اندازه ذرات مناسب (کمتر از ۶۰ میلی‌متر)
- خوراک‌دهی از نوار نقاله پیچشی همراه با همگن‌سازی و رطوبت‌دهی

با توجه به میزان خوراک درنظرگرفته‌شده برای این فرآیند، نمودار جریانی زیر، موازنه جرم و انرژی مورد نیاز برای واحد ذخیره‌سازی، پیش‌تصفیه و خوراک‌دهی فرآیند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، با توجه به این‌که عملیات پیش‌تصفیه مربوط به پسماند شهری، محدود به فرآیندهای مکانیکی خرد کردن جهت تولید اندازه ذرات مناسب است، میزان جریان ورودی و خروجی از این مرحله برابر است.



شکل (۸-۲) نمودار جریانی واحد پیش‌تصفیه شامل سیستم ذخیره‌سازی، پیش‌تصفیه و خوراک‌دهی (خوراک پسماند شهری)

هزینه سرمایه‌گذاری این بخش شامل تجهیزات ذخیره‌سازی، پیش‌تصفیه و خوراک‌دهی سیستم بر اساس اطلاعات موجود در منابع برابر ۱/۷ میلیون یورو تخمین زده شده است [۹۷، ۹۹، ۱۰۱-۱۰۵]. فرضیات مورد استفاده و محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۲ (صفحه ۱) ارائه شده است.

۸-۳- واحد پیش‌تصفیه بر اساس خوراک فضولات دامی

۸-۳-۱- واحد حذف شن و ماسه

آسایش دام یک عنصر کلیدی برای افزایش سودآوری از حیث تولید محصولات لبنی از دید دامداران و دامپزشکان است. با توجه به رشد حداقلی باکتری‌های مضر برای دام در بسترهای شن و ماسه، این نوع بسترها، انتخاب اغلب دامداران جهت فراهم کردن شرایط آسایش برای دام محسوب می‌شوند. علاوه بر مزیت بیولوژیکی بسترهای شن و ماسه، ویژگی‌های فیزیکی مثبت نظیر فراهم شدن سطح نرم هنگام خوابیدن و کاهش فشار بر زانوها و مفاصل دام از دیگر مزایای این بسترها هستند. با این وجود، بسترهای شنی چالش‌های قابل‌توجهی در مدیریت کود دامی ایجاد می‌کند. سیستم‌های هضم بی‌هوازی به ویژه در برابر رسوب ماسه و سایش تجهیزات حساس هستند. بر این اساس، استفاده از سیستم‌های پیش‌تصفیه برای جداسازی شن و ماسه از کود جهت افزایش کارایی سامانه هضم، ضروری به نظر می‌رسد.

۸-۳-۲- ذخیره‌سازی خوراک

پس از تصفیه اولیه خوراک در مخزن حذف شن و ماسه، مواد اولیه قابل پمپ به‌طور کلی در مخازن بتنی مهر و موم شده، ضد آب و بتن آرمه در زیر یا روی زمین ذخیره می‌شوند. این مخازن، مانند مخازنی که در کشاورزی برای ذخیره کود مایع استفاده می‌شود، معمولاً دارای ظرفیت ذخیره‌سازی کافی برای یک تا دو روز هستند. برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، کلیه مخازن ذخیره باید مسقف باشند. اگر مخازن ذخیره در مقایسه با هاضم در ارتفاع بالاتری نصب شوند، نیاز به تجهیزات هیدرولیکی (پمپ‌ها) حذف و منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود.
امکان اختلاط، خردکردن، همگن‌سازی و پمپاژ خوراک‌های مختلف همراه با خوراک اصلی در مخازن ذخیره فراهم می‌شود. از گرفتگی، رسوب‌گذاری، تشکیل لایه‌های شناور و ایجاد فازهای جداگانه در مخازن ذخیره خوراک باید اجتناب شود. به همین دلیل، مخازن ذخیره‌سازی برای این منظور مجهز به همزن‌هایی همراه با ابزار مناسب جهت خردکردن و آسیاب کردن مواد اولیه هستند. هم‌زدن مخازن ذخیره به روش مشابه با هم‌زدن هاضم‌ها صورت می‌گیرد.
مخازن ذخیره برای مواد اولیه قابل پمپاژ نیاز به تعمیر و نگهداری محدودی دارند، که شامل حذف لایه‌های رسوب شن و ماسه و سنگ‌ها، که ظرفیت ذخیره مخازن را کاهش می‌دهد، می‌شود. رسوبات تشکیل‌شده با استفاده از تجهیزاتی نظیر کف تراش، پیچ‌های نقاله و پمپ‌های کف‌کش خارج می‌شوند. به منظور به حداقل رساندن انتشار بو در واحدهای تولید بیوگاز و نیز به دلیل برخی ملاحظات عملیاتی، تحویل، ذخیره‌سازی و آماده‌سازی مواد اولیه باید در سالن‌های بسته، مجهز به تهویه بیوفیلتر انجام شود.

۸-۳-۳- له کردن، همگن‌سازی[1]

[1] Mashing, Homogenising

به منظور دستیابی به مواد اولیه با محتوای آب بیشتر، که قابلیت پمپ کردن به هاضم را داشته باشند، همگن‌سازی خوراک ضروری است. این فرآیند در مخازن ذخیره‌سازی خوراک یا پیش‌هاضم‌ها انجام می‌شود. مایعاتی که برای فرآیند له شدن و همگن‌سازی استفاده می‌شود، بسته به دسترس‌پذیری آن‌ها شامل فضولات دامی مایع خام، مواد هضم‌شده، آب فرآیندی و یا حتی آب شیرین است.
مزیت استفاده از مواد هضم‌شده، کاهش استفاده از آب تازه و نیز تلقیح بستر با میکروارگانیسم‌های موجود در هاضم است. با این حال، استفاده از این مواد می‌تواند باعث افزایش محتوای مواد مغذی و نمک در بستر شده و منجر به عدم تعادل فرآیند شود. لازم به ذکر است که استفاده از آب تازه هزینه‌های زیادی را به سیستم تحمیل خواهد کرد.
علاوه بر قابلیت پمپاژ، همگنی بستر عامل مهم دیگری برای پایداری فرآیند هضم است. مواد اولیه قابل پمپ از طریق همزن‌های نصب‌شده در مخازن ذخیره همگن می‌شوند. نوسانات زیاد در خوراک ورودی و ترکیبات موجود در مواد اولیه میکروارگانیسم‌های فرآیند هضم را تحت فشار قرار می‌دهد، زیرا آن‌ها باید خود را با خوراک و شرایط جدید تطبیق دهند. تجربه نشان می‌دهد که ایجاد نوسانات زیاد در خوراک ورودی به هاضم درنهایت منجر به کاهش بازده تولید بیوگاز خواهد شد. ازاین‌رو داشتن یک منبع ثابت و پایدار برای مدت‌زمان طولانی سهم قابل توجهی در عملکرد سالم و بازده مناسب هاضم خواهد داشت.

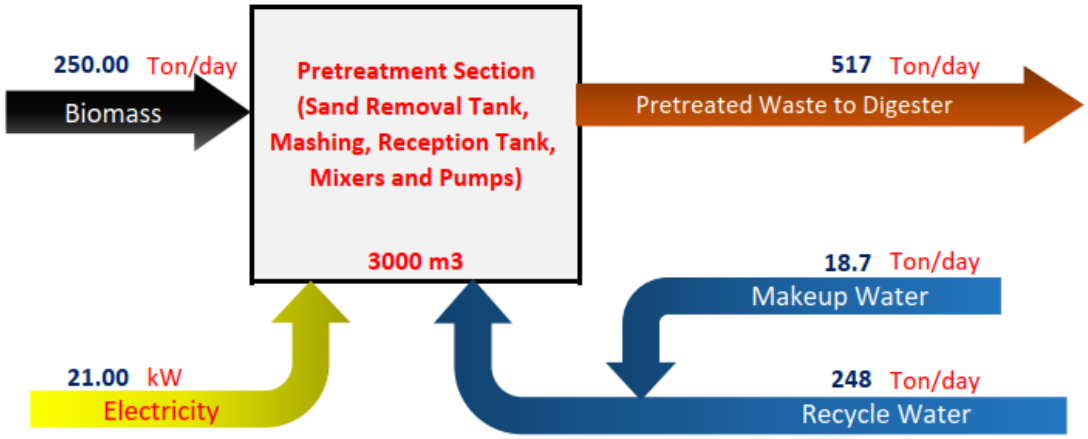
۸-۳-٤- سیستم خوراک‌دهی

مواد اولیه بعد از ذخیره‌سازی و پیش‌تصفیه، به عنوان خوراک وارد هاضم می‌شود. با توجه به مباحث مطرح شده، خوراک مورد استفاده در این مطالعه از طریق روش‌های پیش‌تصفیه مطرح شده (خرد کردن، له کردن و همگن‌سازی از طریق هم‌زدن پیوسته)، به عنوان یک خوراک قابل پمپ در دسترس خواهد بود.
انتقال خوراک قابل پمپ از مخزن ذخیره به داخل هاضم توسط پمپ‌ها انجام می‌شود. برای این منظور دو نوع پمپ به‌طور معمول استفاده می‌شود: پمپ‌های سانتریفیوژ و جابجایی. پمپ‌های سانتریفیوژ اغلب به صورت غوطه‌ور مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال امکان استفاده از آن‌ها در حالت خشک نیز وجود دارد. پمپ‌های جابجایی (پمپ‌های پیستونی چرخان، پمپ‌های اسکرو گریز از مرکز) مقاومت بیشتری نسبت به پمپ‌های سانتریفیوژ در برابر فشار دارند. با این حال، استفاده از پمپ‌های سانتریفیوژ، با توجه به قیمت پایین‌تر، از مقبولیت بیشتری برخوردار است. با توجه به خوراک مدنظر در این بخش (فضولات دامی)، سیستم پیش‌تصفیه و خوراک‌دهی خوراک شامل تجهیزات زیر می‌باشد:

- مخزن حذف شن و ماسه؛
- له‌کردن و همگن‌سازی خوراک از طریق افزایش محتوای مایع (از طریق بازگردانی بخشی از آب جداشده از مواد هضم‌شده) و استفاده از همزن در مخزن ذخیره
- خوراک‌دهی از طریق پمپ‌های سانتریفیوژ

با توجه به میزان خوراک درنظرگرفته‌شده، نمودار جریانی زیر موازنه جرم و انرژی مورد نیاز برای واحد ذخیره‌سازی، پیش‌تصفیه و خوراک‌دهی فرآیند را نشان می‌دهد.

حجم در نظر گرفته شـده برای مخزن ذخیره برابر با ذخیره ۵ روز خوراک همراه با آب مورد نیاز فرآیند می‌باشـد. بر این اساس یک مخزن ذخیره با حجم m^3 ۳۰۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین، محاسبات مربوط به میزان آب مورد نیاز برای رقیق کردن خوراک نیز در بخش محاسبات مربوط به هاضم ارائه شده است. هزینه سرمایه‌گذاری این بخش شامل تجهیزات ذخیره‌سازی، پیش‌تصفیه و خوراک‌دهی سیستم بر اساس اطلاعات موجود در منابع برابر ۴۰۰ هزار یورو تخمین زده شده است [۹۷, ۱۰۱–۱۰۴, ۱۰۶]. فرضیات مورد استفاده و محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۳ (صفحه ۱) ارائه شده است.



شکل (۸–۳) نمودار جریانی واحد پیش‌تصفیه شامل سیستم حذف شن و ماسه، له‌سازی و خوراک‌دهی (خوراک فضولات دامی)

۸-٤- واحد هاضم

هسته اصلی واحد تولید بیوگاز هاضم است، یک مخزن راکتور هوابند[1]، که در آن تجزیه مواد اولیه در غیاب اکسیژن صورت گرفته و بیوگاز تولید می‌شود. ویژگی‌های مشترک همه هاضم‌ها، صرف‌نظر از اینکه ضدهوا هستند، این است که دارای سیستم خوراک‌دهی مواد اولیه و همچنین سیستم‌های تخلیه بیوگاز و مواد هضم‌شده هستند. با توجه به تغییرات آب و هوا در فصول مختلف، هاضم‌های بی‌هوازی باید مجهز به عایق و تجهیزات حرارت‌دهی باشند.

[1] Air Proof Reactor Tank

جدول)۸-۲(ویژگی‌های هاضم‌های پیوسته [۹۷]

هاضم‌های اختلاط کامل	هاضم جریان قالبی
▪ مخزن مدور، ساخت آسان، عمودی	▪ مخزن افقی و طویل
▪ اختلاط کامل	▪ اختلاط در راستای عمودی
▪ مناسب برای خوراک‌های ساده (دوغابی)	▪ مناسب برای خوراک‌های سخت (جامد)
▪ بخشی از خوراک هضم‌نشده می‌تواند به خروجی برسد	▪ در حالت نرمال، هیچ میانبری بین ورودی و خروجی وجود ندارد
▪ دمای عملیاتی بین ۲۰ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد	▪ دمای عملیاتی بین ۳۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد
▪ زمان ماند بین ۳۰ تا ۹۰ روز	▪ زمان ماند بین ۱۵ تا ۳۰ روز

انواع مختلفی از هاضم وجود دارد. این رآکتورها می‌توانند از بتن، فولاد، آجر یا پلاستیک، و به شکل سیلوها، چاله-ها، حوضچه‌ها یا استخرها ساخته شوند و ممکن است در زیر زمین یا سطح قرار گیرند. اندازه هاضم‌ها تعیین‌کننده مقیاس واحدهای تصفیه و استفاده از بیوگاز است و از چند مترمکعب برای کاربردهای خانگی تا چندین هزار مترمکعب در مقیاس صنعتی وجود دارند.

طراحی یک هاضم با توجه به محتوای ماده خشک بستر خوراک تعیین می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، هاضم بی‌هوازی به‌طور کلی به دو دسته هاضم تر، با محتوای مواد جامد کمتر از ۱۵٪ و هاضم خشک، با محتوای جامد بین ۲۰ تا ۴۰ درصد، تقسیم می‌شود. علاوه بر این از حیث نحوه خوراک‌دهی و تخلیه بیوگاز و مواد هضم‌شده، هاضم‌ها به دو دسته ناپیوسته و پیوسته تقسیم می‌شوند.

در هاضم پیوسته، مواد اولیه به‌طور مداوم وارد رآکتور شده و بیوگاز و مواد هضم‌شده از آن خارج می‌شوند. هاضم-های پیوسته می‌توانند در قالب یک مخزن عمودی، افقی و یا مخازن چندگانه باشند. بسته به سیستم همزن مورد استفاده، هاضم‌ها به دو نوع اختلاط کامل[1] (به‌طور معمول از نوع عمودی) و جریان قالبی[2] (به‌طور معمول از نوع افقی) طبقه‌بندی می‌شوند. جدول زیر برخی ویژگی‌های رآکتورهای اختلاط کامل و جریان قالبی را نشان می‌دهد.

در عمل، بیشتر هاضم‌ها به صورت مخازن همزن‌دار و عمودی انتخاب می‌شوند. رآکتورهای عمودی معمولاً در محل، به صورت مدور و از جنس فولاد یا بتن‌آرمه، و اغلب با کف مخروطی شکل جهت تسهیل فرآیند هم‌زدن و حذف رسوبات شن و ماسه ساخته می‌شوند. این مخازن ضدهوا، عایق‌بندی‌شده و مجهز به تجهیزات حرارت‌دهی و همزن ساخته می‌شوند. علاوه بر این هاضم‌ها با یک سقف بتنی، فولادی و یا غشای گازبند پوشیده می‌شوند و بیوگاز تولیدی در یک مخزن ذخیره جداگانه و یا زیر غشای ضدگاز جمع‌آوری می‌شود.

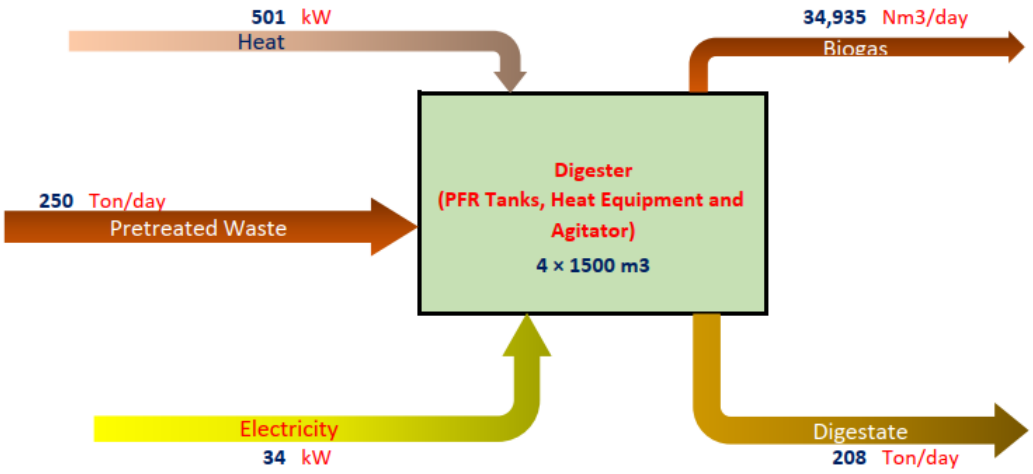
هاضم‌های بتنی به دلیل اشباع بودن از آب ناشی از رطوبت موجود در خوراک و بیوگاز، به اندازه کافی در مقابل نشت گاز مقاوم هستند. مخازن بتنی می‌توانند به‌طور کامل یا جزئی در زمین ساخته شوند. ساخت‌وساز نامناسب می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی، نشت، خوردگی و در موارد شدیدتر، منجر به تخریب هاضم شود. با استفاده از بتن با کیفیت مناسب، طراحی و ساخت حرفه‌ای می‌توان از وقوع این مشکلات جلوگیری کرد.

[1] Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)
[2] Plug Flow

هاضم‌های فولادی بر روی فونداسیون بتنی نصب می‌شوند. صفحات فولادی یا جوش داده می‌شوند و یا به‌هم پیچ می‌شوند که در هر دو حالت درزها باید محکم شوند تا هیچ‌گونه نشت گاز رخ ندهد. این نوع هاضم‌ها همواره روی سطح زمین نصب می‌شوند [۹۷].

۸-٤-۱- هاضم جریان قالبی (خوراک پسماند شهری)

با توجه به محتوای جامد پسماند شهری، هاضم نیمه‌خشک جریان قالبی انتخاب شده است. فرآیند هضم در دمای ثابت ۵۵ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود.لازم به ذکر است که با توجه به تولید حرارت در بخش CHP، فرآیند گرمادوست[1] در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد برای این منظور انتخاب شده است. انتخاب دمای بالا جهت انجام فرآیند هضم، منجر به افزایش سرعت هضم تا ۱/۵ برابر نسبت به فرآیندهای انجام شده در دمای معتدل خواهد شد.
یک دستگاه همزن که به آرامی می‌چرخد، خروج گاز از بستر زیست‌توده را تضمین، و از ته‌نشین‌شدن مواد سنگین در بستر هضم جلوگیری می‌کند. همچنین دمای هاضم از طریق سیستم حرارت‌دهی نصب‌شده در داخل آن، در دمای ثابت طراحی حفظ خواهد شد. فضای موجود در قسمت بالای هاضم به عنوان محفظه ذخیره بیوگاز تولیدی عمل می‌کند. در نهایت بیوگاز تولید از مسیر خروجی تعبیه‌شده از بالای هاضم خارج می‌شود [۱۰۵].



شکل (۸-۴) نمودار جریانی واحد هاضم شامل رآکتور جریان قالبی، تجهیزات حرارتی و همزن مکانیکی (خوراک پسماند شهری)

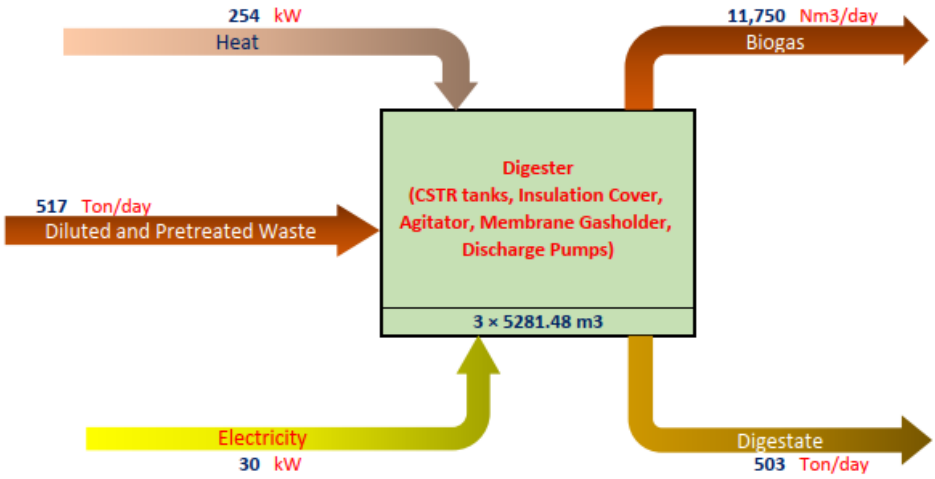
واحد هاضم جریان قالبی با نرخ بارگذاری مواد فسادپذیر[2] (OLR) ۱۰ طراحی شده است. بر این اساس چهار هاضم با حجم هر کدام ۱۸۱۵ متر مکعب (قطر ۸/۵ متر و طول ۳۲ متر) در نظر گرفته شده است. هزینه سرمایه-گذاری این بخش شامل مجموعه هاضم‌ها مجهز به همزن و تجهیزات حرارت‌دهی و عایق‌های حرارتی، برابر ۱/۲ میلیون یورو تخمین زده شده است. فرضیات مورد استفاده و محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۲ (صفحه ۲ و ۳) ارائه شده است.

[1] Thermophilic
[2] Organic Load Rate

۸-٤-۲- هاضم اختلاط کامل (خوراک فضولات دامی)

با توجه به مزایای هاضم‌های تر و پیوسته و استفاده فراگیر از آن‌ها در واحدهای تجاری و در مقیاس بزرگ، در این مطالعه، هاضم تر و پیوسته به شکل راکتور همزن‌دار و عمودی، جهت هضم خوراک فضولات دامی در نظر گرفته شده است. بسته به محتوای جامد این خوراک، آب موجود در مواد هضم‌شده، جدا شده و در مخازن ذخیره خوراک با خوراک پیش‌تصفیه‌شده، مخلوط شده و سپس خوراک رقیق‌شده با محتوای جامد موردنظر وارد هاضم می‌شود. اجزاء تشکیل‌دهنده واحد هاضم با خوراک فضولات دامی به شرح زیر است:

- هاضم تر تک‌مرحله‌ای از نوع مخزن اختلاط کامل فولادی مجهز به تجهیزات حرارت‌دهی و عایق‌های حرارتی؛
- همزن‌ها؛
- مخزن ذخیره‌سازی بیوگاز (غشاهای هوابند)؛
- پمپ‌های تخلیه؛



کل (۸–۵) نمودار جریانی واحد هاضم شامل راکتور همزن‌دار، تجهیزات حرارتی و مخازن ذخیره‌سازی گاز (خوراک فضولات دامی)

واحد هاضم تر با نرخ بارگذاری مواد فسادپذیر (OLR) ۴ طراحی شده است. بر این اساس، سه هاضم با حجم هر کدام ۵۲۸۴ متر مکعب (قطر ۲۹ متر و ارتفاع ۸ متر) در نظر گرفته شده است. همچنین، حجم مورد نیاز ذخیره بیوگاز با فرض ظرفیت ذخیره ۸ ساعت تولید بیوگاز، برابر m^3 ۴۰۰۰ تخمین زده شده است که می‌توان از دو مخزن با حجم m^3 ۲۰۰۰ برای این منظور استفاده کرد. هزینه سرمایه‌گذاری این بخش شامل مجموعه هاضم‌ها مجهز به همزن و تجهیزات حرارت‌دهی، عایق‌های حرارتی و مخازن ذخیره گاز برابر ۱/۵ میلیون یورو تخمین زده شده است [۹۷, ۱۰۳, ۱۰۶, ۱۰۸]. فرضیات مورد استفاده و محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۳ (صفحه ۲ و ۳) ارائه شده است.

۸-۵- واحد مدیریت مواد هضم‌شده

مواد هضم‌شده حاصل از فرآیند قابلیت استفاده به عنوان کود یا تقویت‌کننده خاک را دارد. با افزایش طرح‌های متنوع و با ظرفیت بالای واحدهای هضم بی‌هوازی انواع پسماندهای فسادپذیر، فناوری‌های فرآوری مواد هضم‌شده نیز مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. این فناوری‌ها بر اساس رویکردهای متفاوت زیر می‌توانند مورد توجه قرار گیرند:

- افزایش ارزش مواد هضم‌شده؛
- استفاده ایمن از مواد هضم‌شده؛
- ایجاد بازارهای جدید برای مواد هضم‌شده؛
- کاهش هزینه‌های عملیاتی؛

اصطلاح آب‌گیری[1] برای تشریح فرآیند جداسازی فاز جامد و مایع مواد هضم‌شده جهت دستیابی به فیبر جداشده با محتوای جامد بیش از ۱۸٪ است. با عبور تمام مواد هضم‌شده از این فرآیند، حدود ۸۰٪ از جرم کل در فاز مایع جداشده، حذف و کیک آب‌گیری‌شده به عنوان محصول این فرآیند باقی می‌ماند. غالب آمونیوم و پتاسیم در فاز مایع و غالب فسفر در کیک آبگیری‌شده باقی می‌مانند.

آب‌گیری اغلب به عنوان اولین مرحله در فرآوری مواد هضم‌شده استفاده می‌شود. فیبر حاصل از این فرآیند یک "کیک" نیمه‌جامد است که ذخیره آن آسان‌تر است. علاوه بر این، کاهش حجم این مواد، مدیریت و حمل آن را برای اهداف بعدی آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر خواهد کرد. آب‌گیری همچنین یک روش مفید و مؤثر برای بهبود امکان استفاده از مواد هضم‌شده در زمین به عنوان کود و تقویت‌کننده خاک محسوب می‌شود. با این وجود، ازآنجاکه محتوای مواد مغذی کمتر از مواد هضم‌شده خروجی از هاضم است، محتوای این مواد جهت استفاده در زمین باید مدنظر قرار گیرد.

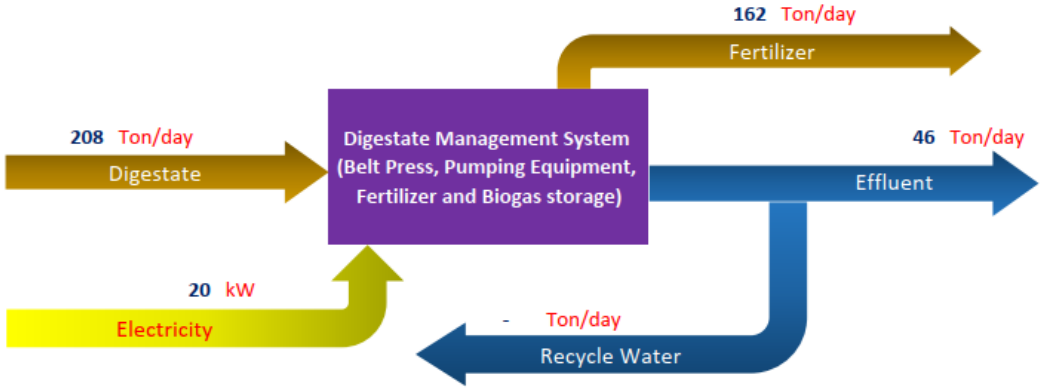
فاز مایع تولیدشده در فرآیند آب‌گیری حاوی مقادیر زیادی آمونیوم و پتاسیم خواهد بود. بسته به نیازهای خاص، احتمالاً این پساب قبل از تخلیه در فاضلاب عمومی به نوعی تصفیه نیاز دارد. بازیابی بخشی از فاز مایع برای فرآوری خوراک، به عنوان رقیق‌کننده و همگن‌ساز، تا غلظت قابل قبول مواد جامد در خوراک هاضم امکان‌پذیر است. با این حال پساب باقی‌مانده از این فرآیند جهت تخلیه به سایر فاضلاب‌های عمومی نیاز به نوعی تصفیه شامل حذف مواد مغذی دارد [۱۰۹].

در این مطالعه، از یک پرس تسمه‌ای جهت جداسازی فاز جامد موجود در مواد هضم‌شده تا محتوای ۲۵٪ استفاده شده است. فاز جامد جداشده پس از افزودن مواد مغذی، قابلیت استفاده به عنوان کود را خواهد داشت [۱۱۰]. با توجه به نیازهای فصلی به کود، یک مخزن بتنی همراه با تجهیزات ذخیره‌سازی گاز جهت ذخیره کود حاصل از فرآیند آب‌گیری به مدت ۶ ماه در نظر گرفته شده است. با توجه به پتانسیل تولید بیوگاز باقیمانده در این مواد، امکان تولید بیوگاز تا ۱۰٪ بیوگاز تولیدی در هاضم نیز وجود دارد. همچنین، بخشی از مایع حاصل از فرآیند آب‌گیری جهت رقیق‌سازی و همگن‌سازی به مخزن ذخیره خوراک بازگردانده می‌شود. جهت جلوگیری از انباشت مواد مغذی نظیر آمونیوم و پتاسیم، ۱۰ درصد از آب مورد نیاز جهت رقیق‌سازی خوراک از آب تازه فرآیندی تأمین خواهد شد.

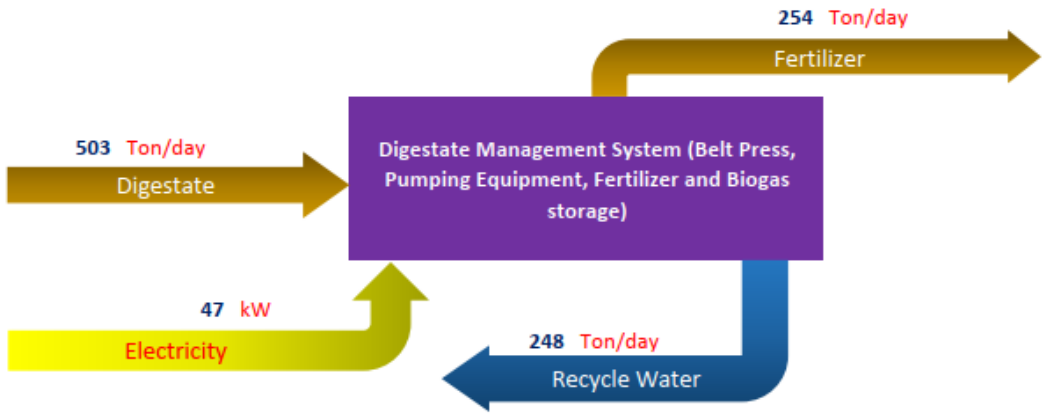
[1] Dewatering

در پرس تسمه‌ای از نیروهای برشی و فشار مکانیکی تولیدشده بین دو تسمه پارچه‌ای متخلخل غیرهم‌جهت برای آب‌گیری استفاده می‌شود. این فرآیند معمولاً شامل سه مرحله است: ۱) گرانش، ۲) فشار کم و ۳) فشار بالا. مواد هضم‌شده به‌طور مداوم وارد بخش گرانش شده و آب آزاد از طریق جاذبه خارج می‌شود. در ادامه، فشار کم از طریق دو تسمه پارچه‌ای متخلخل، قبل از اعمال فشار بالا و نیروی مکانیکی از طریق عبور تسمه‌ها از سری غلتک‌ها، اعمال می‌شود. "کیک" آب‌گیری‌شده توسط تیغه‌های تراشنده از تسمه خارج می‌شود. فاز مایع نیز با نفوذ در تسمه‌ها جمع‌آوری می‌شود [۱۰۹].

نمودارهای جریانی زیر موازنه جرم و انرژی مورد نیاز برای واحد مدیریت مواد هضم‌شده در دو حالت خوراک پسماند شهری و فضولات دامی را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۶) نمودار جریانی واحد مدیریت مواد هضم‌شده شامل پرس تسمه‌ای، پمپ‌ها و ذخیره‌سازی کود و بیوگاز (خوراک پسماند شهری)



شکل (۸-۷) نمودار جریانی واحد مدیریت مواد هضم‌شده شامل پرس تسمه‌ای، پمپ‌ها و ذخیره‌سازی کود و بیوگاز (خوراک فضولات دامی)

هزینه سرمایه‌گذاری این بخش شامل پرس تسمه‌ای، پمپ‌های مورد نیاز جهت پمپاژ فاز مایع و مواد هضم‌شده و ذخیره گاز در مخازن بتنی مجهز به پوشش غشایی جهت جمع‌آوری بیوگاز، برابر ۵۲۸ هزار یورو برای خوراک پسماند شهری و ۷۵۲ هزار یورو برای خوراک فضولات دامی تخمین زده شده است [۹۷، ۱۰۴، ۱۰۹ و ۱۱۱]. فرضیات مورد استفاده و محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۲ و ۳ (صفحه ۴) ارائه شده است.

۸-۶- واحد تصفیه بیوگاز

بیوگاز خام تولیدشده در هاضم، از بخار آب اشباع است و علاوه بر متان و دی‌اکسید کربن، حاوی برخی آلاینده‌ها نظیر بخار آب، سولفید هیدروژن، سیلوکسان و آمونیاک است. سولفید هیدروژن یک گاز سمی با بوی خاص و ناخوشایند است و از ترکیب آن با بخار آب موجود در بیوگاز، اسید سولفوریک تشکیل می‌شود. با توجه به خاصیت خورندگی اسید سولفوریک که می‌تواند باعث صدمه به موتورهای CHP، خطوط لوله گاز و ... شود، بیوگاز تولیدی باید گوگردزدایی و خشک شود.

سازندگان واحدهای CHP حداقل خصوصیات مربوط به گاز قابل احتراق جهت تضمین عملکرد آن و جلوگیری از صدمه دیدن موتورها را ارائه می‌دهند. جدول ۲ برخی ویژگی‌های مورد نیاز بیوگاز برای استفاده در واحدهای CHP در حالت کلی را نشان می‌دهد.

بیوگاز تولیدشده توسط هاضم می‌تواند حاوی سطوح مختلف سولفید هیدروژن باشد. برای جلوگیری از خوردگی بیش از حد و زوال سریع و پرهزینه روغن روانکاری، موتورهای متداول مورد استفاده برای تولید هم‌زمان برق و گرما، به بیوگاز با سطح H_2S زیر (ppm) ۷۰۰ نیاز دارند.

جدول)۸-۳(خصوصیات حداقلی گازهای قابل احتراق [۹۷]

پارامتر	نمایه	محدوده مجاز
ارزش حرارتی (ارزش حرارتی پایین)	H_u	بیش از ۴ kWh/m^3
محتوای گوگرد کل	S	کمتر از ۲/۲ g/m^3 CH_4
یا محتوای H_2S	H_2S	کمتر از ۰/۱۵ درصد حجمی
محتوای کلر کل	Cl	کمتر از ۱۰۰ mg/m^3 CH_4
محتوای فلوئور کل	F	کمتر از ۵۰ mg/m^3 CH_4
مجموع کلر و فلوئور	(Cl + F)	کمتر از ۱۰۰ mg/m^3 CH_4
ذرات معلق (۳ تا ۱۰ میکرومتر)	–	کمتر از ۱۰ mg/m^3 CH_4
رطوبت نسبی	φ	کمتر از ۹۰ درصد
فشار جریان قبل از ورود به مسیر کنترل گاز	P_{Gas}	۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌بار
نوسان فشار گاز	-	کمتر از ۱۰٪ ± مقدار مقرر
دمای گاز	T	۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد
هیدروکربن (بزرگ‌تر از C5)	-	کمتر از ۰/۴ mg/m^3 CH_4
سیلیکون	Si	کمتر از ۱۰ mg/m^3 CH_4

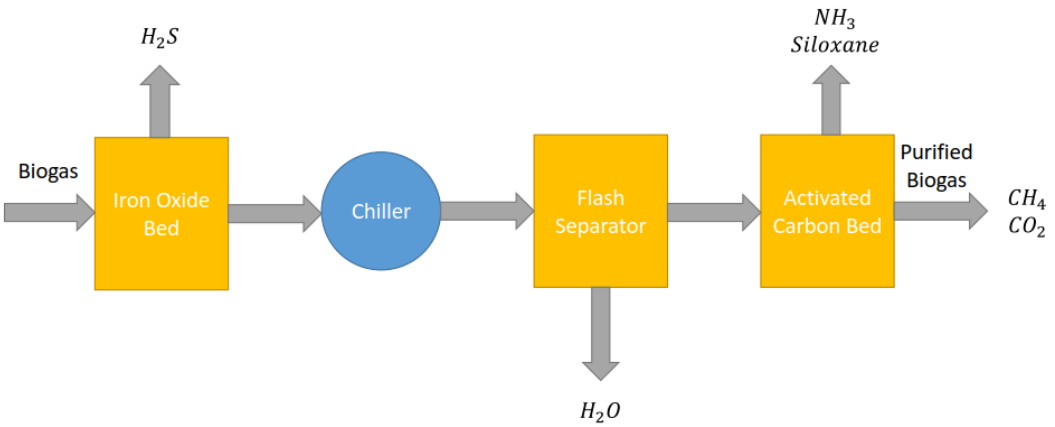
گوگردزدایی بیوگاز می‌تواند با روش‌های مختلف بیولوژیکی یا شیمیایی، در داخل یا خارج هاضم انجام شود. روش مورد استفاده در نهایت بستگی به محتوای H_2S، ظرفیت مورد نیاز و تأسیسات در دسترس دارد. به عنوان مثال، در صورتی که آب کافی در دسترس نباشد، استفاده از روش‌های بر پایه شستشو با آب نمی‌تواند گزینه مناسبی برای این فرآیند باشد.

بسته به شرایط، سرعت تولید بیوگاز می‌تواند به‌طور قابل توجهی نوسان کند. تولید بالاتر بیوگاز و در نتیجه، میزان توان عملیاتی بالاتر می‌تواند در پی نوسانات فصلی خوراک و یا ورود بیش از اندازه خوراک به هاضم مشاهده شود. نرخ تولید تا ۵۰ درصد بیشتر از حد نرمال می‌تواند برای فواصل زمانی کوتاه رخ دهد. به همین دلیل و برای اطمینان از گوگردزدایی کامل، استفاده از تجهیزات گوگردزدایی با ابعاد بزرگ‌تر، در مقایسه با میزان متوسط تولید، ضروری است [۹۷].

حذف سولفید هیدروژن از بیوگاز می‌تواند از طریق فرآیندهای شیمیایی مختلف مانند بسترهای جذب جامد، حلال‌های شیمیایی و حلال‌های فیزیکی انجام شود. در این گزارش از فناوری بسترهای جذب جامد، با توجه به استفاده متداول از این روش در صنعت، استفاده شده است. مزیت اصلی استفاده از این روش، عدم استفاده از آب در این فرآیند است. انواع مختلفی از جاذب‌ها مانند اکسید آهن، سولفا تریت[1]، اکسید روی و سرندهای مولکولی برای این کاربرد وجود دارد [۹۶]. حذف H_2S با استفاده از بستر اکسید آهن نیاز به کنترل دما و pH دارد. جهت دستیابی به بازده حذف بهینه، دما باید زیر ۴۷ درجه سانتی‌گراد حفظ شود، درحالی‌که pH باید در شرایط بازی (محدوده ۸ تا ۱۰) حفظ شود تا واکنش بین سولفید هیدروژن و اکسید آهن رخ دهد. بر اساس واکنش زیر، هر یک کیلوگرم اکسید آهن (Fe_2O_3) توانایی حذف ۰/۶۴ کیلوگرم H_2S را خواهد داشت [۱۱۲].

$$Fe_2O_3 + 3H_2S \rightarrow Fe_2S_3 + 3H_2O \qquad (۸-۱۱)$$

هرچند، این بازده در حالت تئوری قابل حصول است و در عمل ۸۵٪ این مقدار قابل دستیابی است، به این معنی که هر کیلوگرم اکسید آهن توانایی حذف ۰/۵۴ کیلوگرم سولفید هیدروژن را دارد.

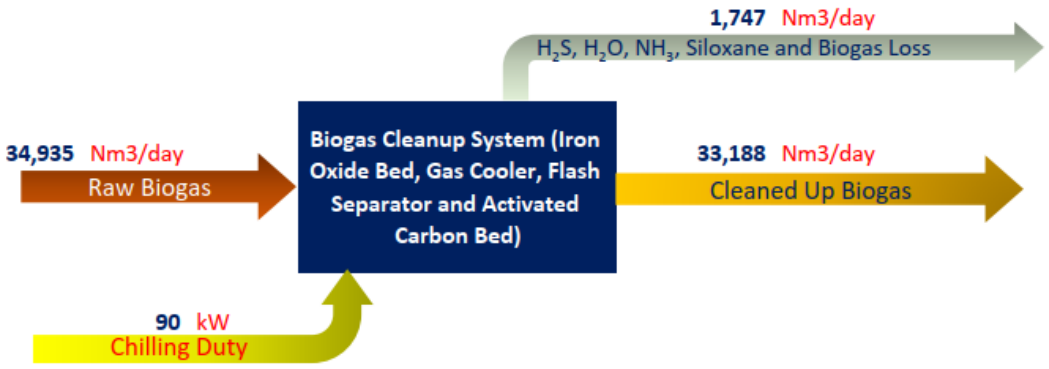


[1] Sulfa-Treat

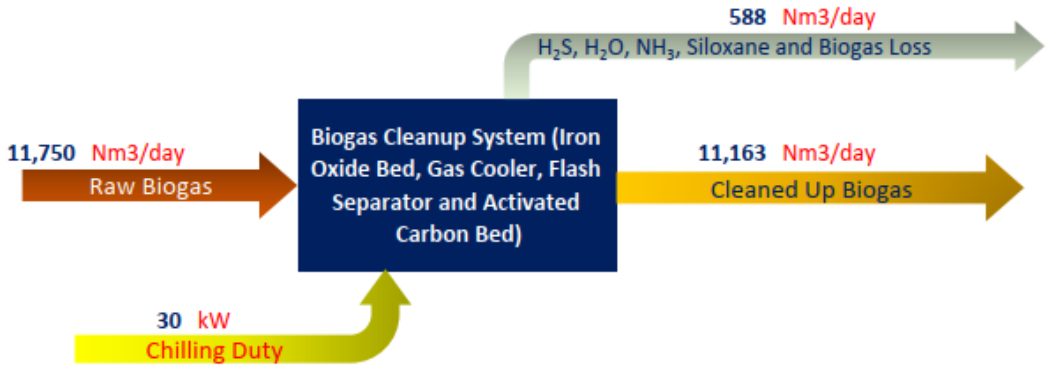
شکل (۸-۸) نمودار جریانی ساده بخش تصفیه بیوگاز

در ادامه جهت جداسازی بخار آب، آمونیاک و سایر آلاینده‌ها، بیوگاز خروجی از بستر جاذب از دو مرحله عبور می‌کند. در مرحله اول، از یک خنک‌کن جهت حذف بخار آب و سایر آلاینده‌های محلول استفاده می‌شود. در ادامه نیز، یک بستر کربن فعال جهت حذف سایر ناخالصی‌ها مانند آمونیاک و سیلوکسان استفاده می‌شود. استفاده از خنک‌کن بعد از بستر اکسید آهن به این دلیل است که واکنش بین H_2S و اکسید آهن نیاز به بخار آب کافی خواهد داشت [۹۶].

بر اساس میزان بیوگاز تولیدشده در هاضم، نمودارهای جریانی زیر موازنه جرم و انرژی مورد نیاز برای واحد تصفیه بیوگاز بر اساس خوراک پسماند شهری و فضولات دامی را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۹) نمودار جریانی واحد تصفیه بیوگاز (خوراک پسماند شهری)



شکل (۸-۱۰) نمودار جریانی واحد تصفیه بیوگاز (خوراک فضولات دامی)

هزینه سرمایه‌گذاری این بخش شامل بستر اکسید آهن، خنک‌کننده و جداکننده آب، بستر کربن فعال همراه با شارژ اولیه جاذب‌ها، برابر ۲۸۰ هزار یورو برای خوراک پسماند شهری و ۱۵۰ هزار یورو برای خوراک فضولات دامی

تخمین زده شده است [۱۱۳]. فرضیات مورد استفاده و محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۲ و ۳ (صفحه ۵) ارائه شده است.

۸-۷- واحد تولید هم‌زمان برق و گرما (CHP)

فناوری‌های مختلف CHP تاکنون در مقیاس صنعتی اجرا شده است که ازجمله آن‌ها می‌توان به فناوری توربین گازی، توربین بخار، پیل سوختی، موتور-ژنراتورهای بیوگازسوز و ... اشاره کرد. موتور-ژنراتورهای بیوگازسوز همانگونه که از نام آنها پیداست، از دو بخش بنیادی موتور و مولد (ژنراتور) تشکیل شده‌اند. موتور از نوع موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی[1] است که از بیوگاز بعنوان سوخت استفاده می‌کند.
موتور-ژنراتورهای بیوگازسوز در ظرفیت‌های مختلف ساخته شده و به بازار عرضه می‌شوند. دامنه تغییرات ظرفیت آن‌ها از ۳۰ کیلووات یا کمتر تا بیش از ۲ مگاوات گسترده است. مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی فنی این تجهیز شامل موارد زیر است؛

- بازدهی الکتریکی
- مصرف سوخت
- مصرف هوا
- فشار گاز ورودی
- شاخص انتشار آلاینده‌ها

بازدهی الکتریکی، عمدتاً بین ۲۸ تا ۴۰ درصد گزارش شده است. بازده الکتریکی خروجی واحد، با چند عامل مهم مانند شرایط اقلیمی، نسبت بار دریافتی از ژنراتور نسبت به بار نامی و ترکیب بیوگاز نسبت به شرایط طراحی تغییر می‌کند.
مصرف ویژهٔ سوخت[2]، شاخص ارزیابی سوخت صرف شده برای تولید واحد انرژی مفید (دراینجا انرژی الکتریکی) است. مصرف ویژهٔ سوخت برحسب واحد انرژی ناخالص گرمایی بر واحد انرژی الکتریکی (kWh_{th}/kWh_e) یا واحد حجم سوخت بر واحد انرژی الکتریکی (m^3_{fuel}/ kWh_e) بیان می‌شود.
هوا مادهٔ مورد نیاز احتراق است و مصرف هوای موتور شاخصی از کارآیی احتراق آن است. احتراق بهینه در شرایطی حاصل می‌شود که هوای مصرفی آن نزدیک به هوای مورد نیاز استوکیومتریک باشد. مصرف هوای بیش از حد، علاوه بر آنکه ابعاد برخی از قطعات و حجم موتور را افزایش میدهد، احتمال تولید اکسیدهای نیتروژن را نیز بالا می‌برد. در مقابل، مصرف هوای کمتر از حد بهینه، بر انتشار هیدروکربن‌های سوخته‌نشده می‌افزاید.
فشار گاز ورودی به موتور در موتورهای گازسوز شاخص مهمی است. چنانچه فشار مورد نیاز برای گاز ورودی به موتور بالا باشد، کمپرسور قویتری باید انتخاب شود و این بر هزینه طرح و بهای تمام‌شدهٔ انرژی می‌افزاید.

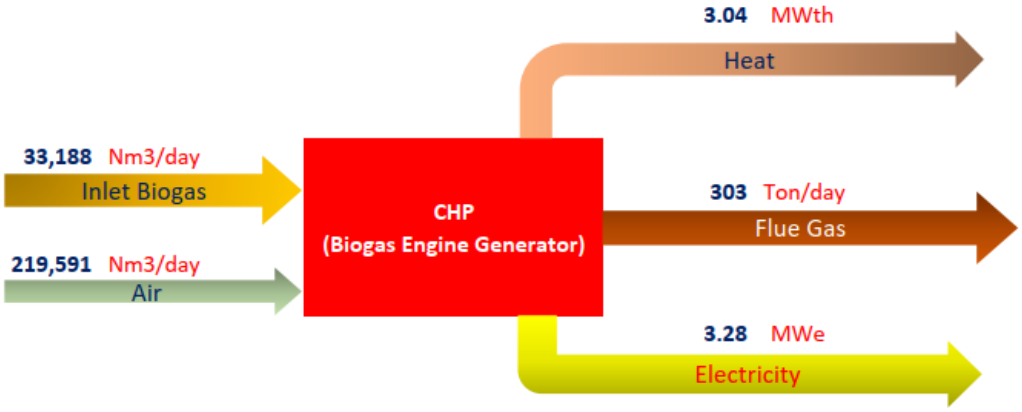
[1] Reciprocating Internal Combustion Engine
[2] Specific Fuel Consumption

شاخص انتشار آلاینده‌ها[1]، یک شاخص زیست‌محیطی است و نشان‌دهندهٔ جرم آلایندهٔ منتشر شده به ازای واحد انرژی الکتریکی تولید شده می‌باشد. هرچه این شاخص بالاتر باشد، آسیب وارده به محیط‌زیست بیشتر است و هزینه‌های پنهان تولید انرژی را افزایش می‌دهد.

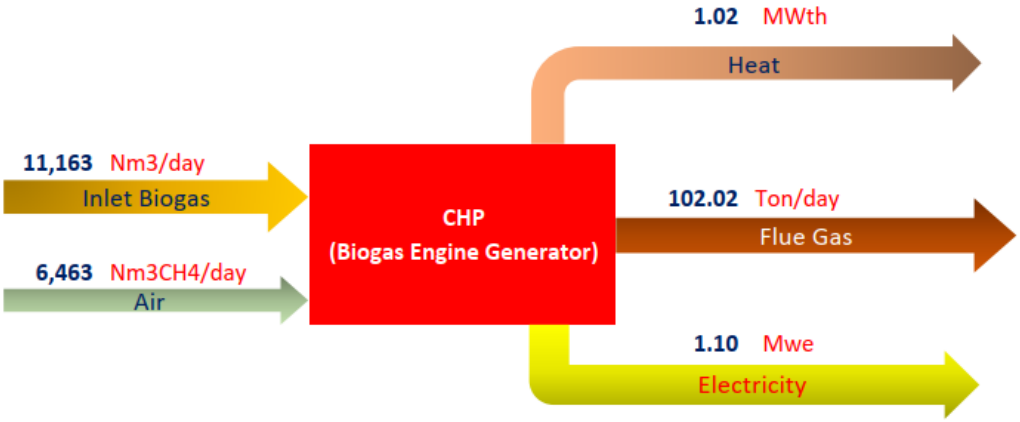
بیوگاز تولیدی در هاضم ابتدا وارد کمپرسور شده و دما و فشار آن افزایش و سپس همراه با هوای فشرده وارد یک موتور–ژنراتور بیوگازسوز می‌شود، که در آن‌جا انرژی‌های الکتریکی و حرارتی تولید و در نهایت، گاز احتراق از طریق دودکش از سیستم خارج می‌شود.

بخشی از حرارت تولیدی در CHP جهت کنترل دمای هاضم به کار گرفته می‌شود. با این حال بخش بیشتر حرارت بازیابی شده، به عنوان گرمای مازاد قابلیت استفاده در سایر واحدهای فعال در مجتمع و یا قابل فروش است. الکتریسیته تولیدی در این واحد نیز علاوه بر استفاده در واحدهای پیش‌تصفیه، واحد هاضم، واحد مدیریت مواد هضم‌شده و سایر مصارف داخل نیروگاه، قابلیت فروش در شبکه برق را خواهد داشت.

بر اساس میزان بیوگاز خروجی از واحد تصفیه بیوگاز، نمودارهای جریانی زیر موازنه جرم و انرژی مورد نیاز برای واحد CHP برای خوراک‌های پسماند شهری و فضولات دامی را نشان می‌دهد.



شکل (۸–۱۱) نمودار جریانی واحد CHP (خوراک پسماند شهری)



[1] Pollutant Emission Index

شکل (۸-۱۲) نمودار جریانی واحد CHP (خوراک فضولات دامی)

هزینه سرمایه‌گذاری این بخش شامل دمنده هوا، کمپرسور، موتور-ژنراتور بیوگازسوز و سایر تجهیزات مکانیکی مورد نیاز برابر ۳/۲ میلیون یورو برای خوراک پسماند شهری و ۱/۱۲ میلیون یورو برای خوراک فضولات دامی تخمین زده شده است [۹۹]. فرضیات مورد استفاده و محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۲ و ۳ (صفحه ۶) ارائه شده است.

۸-۸- واحد فلر

در شرایطی که بیوگاز تولیدی بیشتر از مصرف آن در واحد CHP باشد، که می‌تواند ناشی از نرخ بالاتر تولید بیوگاز یا از مدار خارج شدن بخشی از ظرفیت مصرفی بیوگاز به دلایل فنی مانند تعمیر و نگهداری تجهیزات CHP باشد، راه‌حل‌های پشتیبان مانند ذخیره بیوگاز اضافی یا یک سیستم تولید انرژی اضافی ضروری هستند. ذخیره بیوگاز بدون فشرده‌سازی برای دوره کوتاهی امکان‌پذیر است. اما برای دوره‌های بیش از چند ساعت، به دلیل حجم زیاد گاز تولیدی امکان ذخیره گاز وجود ندارد. واحد تولید انرژی اضافی (یعنی یک CHP اضافی) نیز از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود. به همین دلیل، هر واحد تولید بیوگاز باید مجهز به یک سیستم فلر در حالت اضطراری باشد [۹۷].

ظرفیت طراحی درنظرگرفته‌شده برای تخمین هزینه سیستم فلر در این مطالعه، برابر ظرفیت بیوگاز تولیدی در هاضم به همراه ۲۰ درصد تولید بیشتر در مواقع اضطراری درنظر گرفته شده است. هزینه درنظرگرفته‌شده برای این بخش شامل درام جداکننده مایع، پمپ، دودکش، نوک فلر و سایر تجهیزات مورد نیاز برای یک سیستم فلر ایمن نظیر مشعل و تجهیزات مربوطه، برابر ۱۶۰ هزار یورو برای خوراک پسماند شهری و ۱۱۰ هزار یورو برای خوراک فضولات دامی تخمین زده شده است. محاسبات مربوط به این بخش در پیوست ۲ و ۳ (صفحه ۷) ارائه شده است.

۸-۹- واحد کنترل

واحد تولید بیوگاز متشکل از تأسیسات پیچیده با روابط تنگاتنگ بین تمام قسمت‌ها است. به همین دلیل، پایش[1] و کنترل متمرکز، بخشی اساسی از کل واحد است که هدف آن، تضمین موفقیت و جلوگیری از خرابی‌ها و توقف‌های احتمالی است. استانداردسازی و توسعه هر چه بیشتر فناوری‌های هضم بی‌هوازی تنها از طریق پایش و مستندسازی

[1] Monitoring

داده‌های مهم امکان‌پذیر است. علاوه بر این، به منظور شناسایی به موقع انحرافات از مقادیر استاندارد و اقدامات اصلاحی مربوطه و در نهایت، تضمین پایداری سیستم، پایش مداوم فرآیند ضروری است [۹۷].
فرآیند پایش شامل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل پارامترهای شیمیایی و فیزیکی است. برای بهینه‌سازی فرآیند بیوشیمیایی و اجتناب از بازدارندگی و یا توقف کامل تولید بیوگاز، آزمایش‌های منظم آزمایشگاهی لازم است. یک پایش حداقلی شامل کنترل پارامترهای زیر می‌شود:

- نوع و مقدار خوراک ورودی به واحد (روزانه)؛
- دمای فرآیند (روزانه)؛
- pH (روزانه)؛
- مقدار و ترکیب درصد بیوگاز (روزانه)؛
- محتوای اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر؛
- سطح بستر خوراک در هاضم و سایر سطوح در مخازن ذخیره؛
- میزان گاز ذخیره‌شده (برای فرآیندهای یکپارچه با واحد CHP)؛

فرآیند پایش باید توسط ارائه‌دهنده فناوری، به عنوان بخشی از خدمات قراردادی، طراحی و ارائه گردد.
کنترل واحدهای بیوگاز از طریق سیستم‌های کنترل فرآیندی مجهز به کامپیوترهای مخصوص برای این کار، به صورت خودکار انجام می‌شود. حتی کنترل از راه دور بی‌سیم نیز امکان‌پذیر است. کنترل خودکار اجزاء زیر از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود:

- تغذیه خوراک؛
- گندزدایی[1]؛
- حرارت‌دهی هاضم؛
- شدت و بسامد هم‌زدن؛
- حذف رسوبات؛
- جداسازی جامدات–مایعات؛
- سیستم مدیریت مواد هضم‌شده؛
- گوگردزدایی؛
- واحد تولید هم‌زمان برق و حرارت؛

۸-۱۰- برنامه‌ریزی و ساخت نیروگاه بیوگاز

هدف از احداث نیروگاه بیوگاز می‌تواند از حفاظت محیط زیست و کاهش پسماند تا تولید انرژی تجدیدپذیر و همراه یا بدون مشوق‌های مالی و غیرمالی باشد. مزرعه‌داران محلی و سازمان‌های مربوطه، تولیدکنندگان و نهادهای

[1] Sanitation

جمع‌آوری پسماندهای فسادپذیر، شهرداری‌ها، تولیدکنندگان انرژی و سایر بازیگران این حوزه به‌طور معمول آغازگر پروژه‌های بیوگاز هستند. از ایده احداث یک پروژه بیوگاز تا پایان عمر واحدهای تولیدی، مراحل زیر طی می‌شود:

۱- ایده پروژه
۲- مطالعات پیش-امکان‌سنجی
۳- مطالعات امکان‌سنجی
۴- برنامه‌ریزی دقیق
۵- پیگیری و دریافت مجوزهای مربوطه
۶- احداث واحد تولید بیوگاز
۷- بهره‌برداری و نگهداری
۸- سرمایه‌گذاری مجدد، نوسازی و جایگزینی اجزاء ناکارآمد
۹- تخریب یا نوسازی

به منظور تعریف یک ایده پروژه بیوگاز قابل دفاع، باید به سؤالات زیر پاسخ داده شود:

- هدف از پروژه بیوگاز چیست؟
- ظرفیت سرمایه‌گذار برای تحقق و پیاده‌سازی پروژه چقدر است؟
- نحوه تأمین پایدار و ایمن مواد اولیه چگونه است؟
- محل احداث واحد بیوگاز کجاست؟

وجود و در دسترس بودن یک منبع پایدار مواد اولیه مهم‌ترین اصل در تعیین محل اجرای پروژه بیوگاز محسوب می‌شود. علاوه بر این، امکان فروش یا استفاده از محصولات نهایی بیوگاز یا بیومتان، برق، گرما و مواد هضم‌شده باید تضمین شود. مرحله بعدی، ارزیابی امکان اجرای پروژه در شرایط محلی است. بنابراین، موارد زیر باید مورد توجه قرار گیرند:

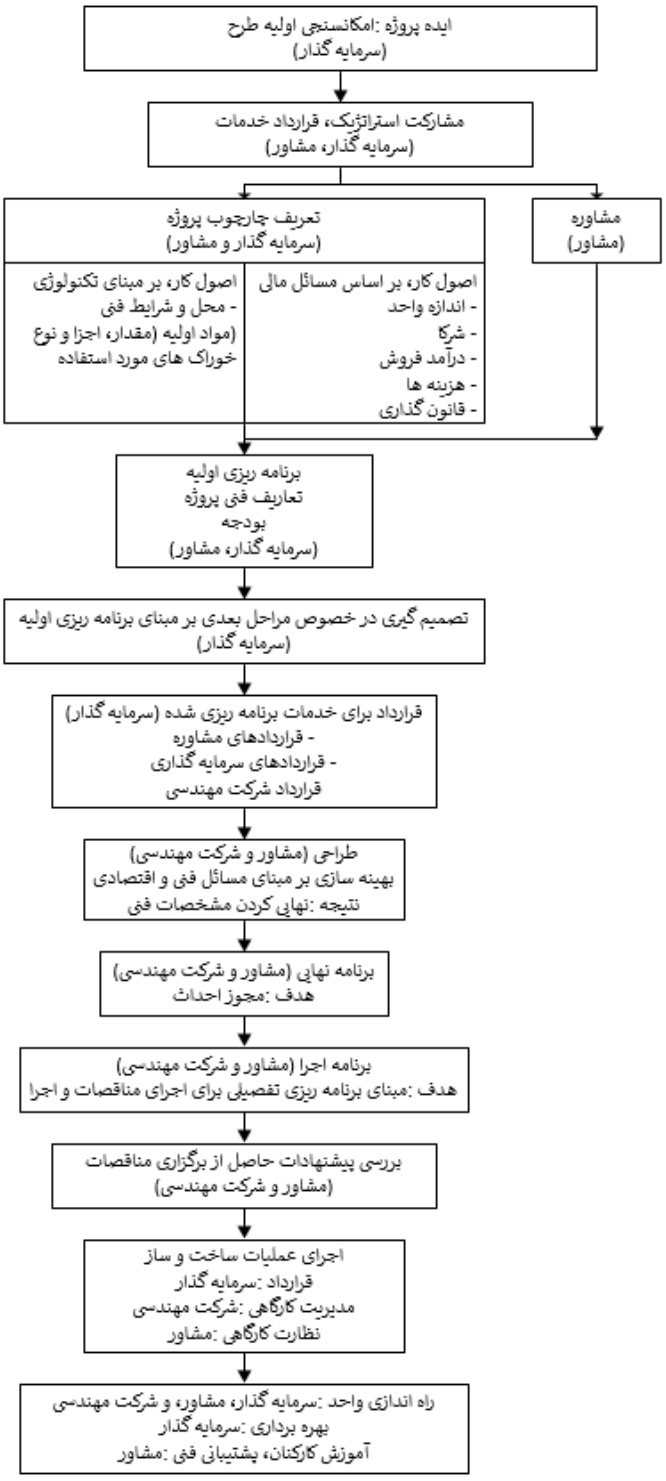
- تعریف و ارزیابی یک طرح تجاری و یک راهبرد تأمین مالی؛
- به‌کارگیری یک شرکت برنامه‌ریزی باتجربه؛
- درگیرکردن بازیگران اصلی مربوطه از مراحل اولیه پروژه (مقامات محلی، شهرداری‌ها، تأمین‌کنندگان مواد اولیه، سازمان‌های تأمین مالی و مردم محلی)

بسته به در دسترس بودن مواد اولیه و توانایی مالی سرمایه‌گذاران، مدل‌های مختلفی برای اجرای موفق یک پروژه بیوگاز وجود دارد.

با وجود رویکردهای منحصر به فرد هر پروژه، برخی مراحل عمومی برای همه پروژه‌های بیوگاز مشابه است (شکل زیر). روند کار با ایده پروژه و امکان‌سنجی اولیه آغاز می‌شود. اگر مجری طرح و سرمایه‌گذار به نقطه تصمیم‌گیری برسند، یک شرکت مشاور در حوزه بیوگاز باید در این مرحله به روند اجرا اضافه شود. علاوه بر این، حضور یک شرکت مهندسی (به عنوان مثال پیمانکار عمومی) نیز برای ادامه روند و اجرای پروژه ضروری است.

به‌موازات این مراحل پروژه، طرح تأمین مالی باید توسعه یابد. وضعیت مالی مشخص، گام‌های پیش‌رو را تعیین می‌کند. روش معمول این است که تا دست‌یابی به یک برنامه‌ریزی اولیه، بدون دخالت بانک‌ها یا سرمایه‌گذاران خارجی، منابع مالی تأمین شود. اگر این امکان وجود نداشته باشد، ممکن است تردیدهایی در خصوص پروژه یا اطمینان‌بخشی سرمایه‌گذار رخ دهد. پیش‌بینی مزایا و خطرات (ریسک‌های) سرمایه‌گذاری نیز باید توسط سرمایه‌گذار لحاظ شود.

برنامه‌ریزی اولیه دربرگیرنده تمام شرایط مرزی (جنبه‌های فنی و بودجه سرمایه‌گذاری)، که برای یک سرمایه‌گذار خارجی اهمیت دارد، است. گزارش برنامه‌ریزی اولیه باید به سرمایه‌گذاران بالقوه ارائه شود. سرمایه‌گذاران بالقوه می‌توانند بانک‌ها، نهادهای سرمایه‌گذاری، اشخاص حقیقی و غیره باشند. امضای توافق‌نامه عدم افشای اطلاعات با کسانی که گزارش برنامه‌ریزی اولیه را دریافت می‌کنند، توصیه می‌شود [۹۷].



شکل (۸-۱۳) مراحل اصلی اجرای پروژه بیوگاز [۹۷]

۸-۱۱- جمع‌بندی

با توجه به آنچه در این گزارش ارائه شـــده، نمودار جریانی کل واحد بیوگاز همراه با موازنه جرم و انرژی برای هر دو حالت خوراک پسماند شهری و فضولات دامی در پیوست ۲ و ۳ (صفحه ۸) ارائه شده است.
جدول زیر میزان تولید برق، حرارت، کود و پســاب تولیدی در واحد را برای هر دو حالت خوراک پســماند شــهری و فضولات دامی نشان می‌دهد.

جدول)۸-۴(میزان محصولات تولیدی از نیروگاه بیوگاز

ردیف	محصول تولیدی	خوراک پسماند شهری	خوراک فضولات دامی
۱	میزان برق تولیدی (kW)	۲۹۸۱	۹۷۶
۲	میزان حرارت (kW)	۲۵۴۱	۷۶۹
۳	میزان کود تولیدی (Ton/day)	۱۶۲	۲۵۴
۴	پساب تولیدی (Ton/day)	۴۶	–

جدول زیر هزینه سرمایه‌گذاری احداث واحدهای مختلف یک نیروگاه بیوگاز از مهندسی تا ساخت، شامل هزینه خرید تجهیزات، ســاختمان‌های صــنعتی و اداری، نصــب تجهیزات، لوله‌کشــی، ابزاردقیق، ســیســتم کنترل و پایش، ادوات الکتریکی و هزینه‌های پیش‌بینی نشده را نشان می‌دهد.

جدول)۸-۵(هزینه احداث واحد نیروگاه بیوگاز

ردیف	مراحل	خوراک پسماند شهری هزار یورو	خوراک فضولات دامی هزار یورو
۱	هزینه مهندسی شامل طراحی مفهومی، برنامه‌ریزی، مدیریت، مهندسی پایه و مهندسی تفصیلی	۵۰۰	۳۵۰
۲	واحد پیش‌تصفیه شامل واحد دریافت خوراک، مرتب‌سازی، ذخیره‌سازی خوراک، خرد کردن، اختلاط، همگن‌سازی، رقیق‌سازی و سیستم خوراک‌دهی به هاضم	۱۷۰۰	۴۰۰
۳	واحد هاضم شامل رآکتورهای همزن‌دار، تجهیزات حرارت‌دهی، و مخازن ذخیره گاز	۱۲۰۰	۱۵۰۰
۴	واحد مدیریت مواد هضم‌شده شامل پرس تسمه‌ای، پمپ‌ها، ذخیره بیوگاز و کود زیستی)	۵۲۸	۷۵۲
۵	واحد تصفیه بیوگاز شامل بسترهای اکسید آهن، خنک‌سازی گاز و مخزن جداسازی آب و بستر کربن فعال	۲۸۰	۱۵۰
۶	نصب واحد CHP از نوع موتور ژنراتورهای بیوگازسوز	۳۲۰۰	۱۱۲۰
۷	واحد فلر شامل درام تبخیر ناگهانی، پمپ‌ها، دودکش و تجهیزات مکانیکی مورد نیاز	۱۶۰	۱۱۰
۸	**مجموع هزینه خرید تجهیزات**	**۷۰۶۸**	**٤۰۳۲**
۹	آماده‌سازی سایت، ساختمان‌های اداری و صنعتی	۳۸۷	۲۹۲
۱۰	نصب تجهیزات	۳۱۰	۲۳۳
۱۱	لوله‌کشی	۳۸۷	۲۹۲
۱۲	ابزار دقیق و سیستم کنترل	۴۶۵	۳۵۰
۱۳	اتوماسیون (سیستم SCADA)	۷۷۴	۵۸۳
۱۴	ادوات الکتریکی	۵۰۳	۳۷۹
۱۵	هزینه‌های پیش‌بینی نشده	۳۸۷	۲۹۲
١٦	**مجموع هزینه‌های جانبی مورد نیاز**	**۳۲۱۳**	**٢٤٢١**
۱۷	**کل هزینه سرمایه‌گذاری**	**۱۰۷۸۱**	**٦٨٠٣**

مراجع

[1] Anonymous, Country analysis brief overview. Independent statistics and analysis Retrieved from U S Energy Information Administration http://www.eia.gov/countries/countrydata.cfm?fips=in., 2014.
[2] Ramnath, N.S., Garbage generated around the world. Retrieved from Frobes India magazine http://forbesindia.com/printcontent/33226, 2012.
[3] Batstone, D. and P. Jensen, Anaerobic processes. 2011.
[4] Anonymous, A short historical background on anaerobic digestion. Food and Agricultural organization United Nations Retrieved from http://www.fao.org/ docrep/t0541e/T0541E04.htm.
[5] Deublein, D. and A. Steinhauser, Biogas from waste and renewable resources: an introduction. 2011: John Wiley & Sons.
[6] Peris, R.S., Biogas process simulation using aspen plus. Department of Chemical Engineering, Biotechnology and Environmental Technology, 2011: p. 88.
[7] Viswanath, P., S.S. Devi, and K. Nand, Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogas production. Bioresource technology, 1992. 40(1): p. 43-48.
[8] Anonymous, NISARGRUNA Biogas plant based on Biodegradable waste resource. retrieved from http://www.barc.gov.in/technologies/kitchen/kitchen_br.html.
[9] Shah, O.P., Sustainable Waste Processing in Mumbai. Implementation of Sustainable Technology, International Journal, 2006. 22.
[10] Zhang, R., et al., Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. Bioresource technology, 2007. 98(4): p. 929-935.
[11] Facchin, V., et al., Effect of trace element supplementation on the mesophilic anaerobic digestion of foodwaste in batch trials: the influence of inoculum origin. Biochemical Engineering Journal, 2013. 70: p. 71-77.
[12] Banks, C.J., et al., Trace element requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations. Bioresource technology, 2012. 104: p. 127-135.
[13] Zhang, L. and D. Jahng, Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements. Waste Management, 2012. 32(8): p. 1509-1515.
[14] Tembhurkar, A. and V. Mhaisalkar, Studies on hydrolysis and acidogenesis of kitchen waste in two phase anaerobic digestion. Journal of the IPHE, India, 2007. 8(2): p. 10-18.
[15] Chen, S., et al., Value-added chemicals from animal manure. 2003, Pacific Northwest National Lab., Richland, WA (US), Environmental Molecular ….
[16] Nizami, A.-S. and J.D. Murphy, What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. 14(6): p. 1558-1568.
[17] Verma, S., Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Columbia University, 2002. 7(3): p. 98-104.
[18] Chaudhary, B.K., Dry continuous anaerobic digestion of municipal solid waste in thermophilic conditions. Asian Institute of technology, Thailand, 2008.

[19] Tchobanoglous, G., H. Theisen, and S. Vigil, Integrated solid waste management: Engineering principles and management lssues. 1993: McGraw-Hill.
[20] Wilkie, A.C., Anaerobic digestion of dairy manure: design and process considerations. Dairy Manure Management: Treatment, Handling, and Community Relations, 2005. 301(312): p. 301-312.
[21] Demirer, G. and S. Chen, Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure. Process biochemistry, 2005. 40(11): p. 3542-3549.
[22] Rapport, J., et al., Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste. Department of Biological and Agricultural Engineering, UC Davis prepared for California Integrated Waste Management Board, CA, USA, 2008.
[23] Vandevivere, P., L. De Baere, and W. Verstraete, Types of anaerobic digester for solid wastes, in Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. 2003, Iwa Publishing. p. 111-140.
[24] Donoso-Bravo, A., et al., Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: a review. Water research, 2011. 45(17): p. 5347-5364.
[25] Chen, X., et al., Application of ADM1 for modeling of biogas production from anaerobic digestion of Hydrilla verticillata. Bioresource technology, 2016. 211: p. 101-107.
[26] Gossett, J.M. and R.L. Belser, Anaerobic digestion of waste activated sludge. Journal of the Environmental Engineering Division, 1982. 108(6): p. 1101-1120.
[27] Batstone, D.J., et al., The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). Water Science and technology, 2002. 45(10): p. 65-73.
[28] Andrews, J.F., Dynamic models and control strategies for wastewater treatment processes. Water Research, 1974. 8(5): p. 261-289.
[29] Bułkowska, K., et al., Kinetic parameters of volatile fatty acids uptake in the ADM1 as key factors for modeling co-digestion of silages with pig manure, thin stillage and glycerine phase. Renewable Energy, 2018. 126: p. 163-176.
[30] Freudenthal, K., et al., Prediction of sulfide formation in sewer pressure mains based on the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Water science and technology, 2005. 52(10-11): p. 13-22.
[31] Gernaey, K., C. Rosén, and U. Jeppsson, WWTP dynamic disturbance modelling–an essential module for long-term benchmarking development. Water science and technology, 2006. 53(4-5): p. 225-234.
[32] Batstone, D.J., J. Keller, and J. Steyer, A review of ADM1 extensions, applications, and analysis: 2002–2005. Water science and technology, 2006. 54(4): p. 1-10.
[33] Huete, E., et al., ADM1-based methodology for the characterisation of the influent sludge in anaerobic reactors. Water Science and Technology, 2006. 54(4): p. 157-166.
[34] Fernandez, B., P. Porrier, and R. Chamy, Effect of inoculum-substrate ratio on the start-up of solid waste anaerobic digesters. Water Science and Technology, 2001. 44(4): p. 103-108.
[35] Blumensaat, F. and J. Keller, Modelling of two-stage anaerobic digestion using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Water Research, 2005. 39(1): p. 171-183.
[36] Parker, W.J., Application of the ADM1 model to advanced anaerobic digestion. Bioresource technology, 2005. 96(16): p. 1832-1842.

[37] Zeeman, G., et al., Anaerobic treatment as a core technology for energy, nutrients and water recovery from source-separated domestic waste (water). Water Science and Technology, 2008. 57(8): p. 1207-1212.
[38] Fezzani, B. and R.B. Cheikh, Implementation of IWA anaerobic digestion model No. 1 (ADM1) for simulating the thermophilic anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid waste in a semi-continuous tubular digester. Chemical Engineering Journal, 2008. 141(1-3): p. 75-88.
[39] Johnson, B. and Y. Shang, Applications and limitations of ADM 1 in municipal wastewater solids treatment. Water science and technology, 2006. 54(4): p. 77-82.
[40] Lübken, M., et al., Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops. Water research, 2007. 41(18): p. 4085-4096.
[41] Angelidaki, I. and W. Sanders, Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology, 2004. 3(2): p. 117-129.
[42] Nopens, I., et al., An ASM/ADM model interface for dynamic plant-wide simulation. water research, 2009. 43(7): p. 1913-1923.
[43] Zaher, U. and S. Chen, Interfacing the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) with manure and solid waste characteristics. Proceedings of the Water Environment Federation, 2006. 1(1): p. 3162-3175.
[44] Zaher, U., et al., A procedure to estimate proximate analysis of mixed organic wastes. Water Environment Research, 2009. 81(4): p. 407-415.
[45] Zaher, U., et al., Transformers for interfacing anaerobic digestion models to pre-and post-treatment processes in a plant-wide modelling context. Environmental Modelling & Software, 2007. 22(1): p. 40-58.
[46] Curry, N. and P. Pillay, Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. Renewable Energy, 2012. 41: p. 200-209.
[47] Van Lier, J.B., N. Mahmoud, and G. Zeeman, Anaerobic wastewater treatment. 2008, IWA Publishing, London, UK. p. 415-456.
[48] Shimada, T., et al., Syntrophic acetate oxidation in two-phase (acid–methane) anaerobic digesters. Water Science and Technology, 2011. 64(9): p. 1812-1820.
[49] Straub, A., et al., Use of the ADM1 to investigate the effects of acetoclastic methanogen population dynamics on mesophilic digester stability. Water Science and Technology, 2006. 54(4): p. 59-66.
[50] Cacho Rivero, J., et al. Effect of SRT on the anaerobic digestion of excess municipal sludge. in Proceedings of WEFTEC. 2002.
[51] Busch, G., Biogas technology. Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Polymers, 2013: p. 279-292.
[52] Madigan, M.T., et al., Brock biology of microorganisms 13th edition. 2010: Benjamin Cummings.
[53] Valcke, D. and W. Verstraete, A practical method to estimate the acetoclastic methanogenic biomass in anaerobic sludges. Journal (Water Pollution Control Federation), 1983: p. 1191-1195.
[54] Zinder, S.H. and M. Koch, Non-aceticlastic methanogenesis from acetate: acetate oxidation by a thermophilic syntrophic coculture. Archives of Microbiology, 1984. 138(3): p. 263-272.

[55] Wett, B., et al., Anaerobic model for high-solids or high-temperature digestion–additional pathway of acetate oxidation. Water science and technology, 2014. 69(8): p. 1634-1640.
[56] Suhartini, S., The anaerobic digestion of sugar beet pulp. 2014, University of Southampton.
[57] Montgomery, L.F. and G. Bochmann, Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. 2014: IEA Bioenergy Ireland.
[58] Kurian, J.K., et al., Feedstocks, logistics and pre-treatment processes for sustainable lignocellulosic biorefineries: a comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 25: p. 205-219.
[59] Monlau, F., et al., Lignocellulosic materials into biohydrogen and biomethane: impact of structural features and pretreatment. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013. 43(3): p. 260-322.
[60] Karthikeyan, O., R. Balasubramanian, and J. Wong, Pretreatment of Organic Solid Substrates for Bioenergy and Biofuel Recovery, in Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. 2017, Elsevier. p. 135-156.
[61] Fisgativa, H., A. Tremier, and P. Dabert, Characterizing the variability of food waste quality: A need for efficient valorisation through anaerobic digestion. Waste management, 2016. 50: p. 264-274.
[62] Izumi, K., et al., International Biodeterioration & Biodegradation. International Biodeterioration & Biodegradation, 2010. 64(7): p. 601-608.
[63] Carrère, H., et al., Impact of initial biodegradability on sludge anaerobic digestion enhancement by thermal pretreatment. Journal of Environmental Science and Health Part A, 2008. 43(13): p. 1551-1555.
[64] Monlau, F., et al., Do furanic and phenolic compounds of lignocellulosic and algae biomass hydrolyzate inhibit anaerobic mixed cultures? A comprehensive review. Biotechnology advances, 2014. 32(5): p. 934-951.
[65] Ariunbaatar, J., et al., Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods. Journal of environmental management, 2014. 146: p. 142-149.
[66] Gundupalli, M.P. and D. Bhattacharyya, Recovery of reducing sugar from food waste: optimization of pretreatment parameters using response surface methodology, in Biofuels and Bioenergy (BICE2016). 2017, Springer. p. 161-172.
[67] Kiran, E.U., et al., Bioconversion of food waste to energy: a review. Fuel, 2014. 134: p. 389-399.
[68] Yin, Y., et al., Enzymatic pretreatment of activated sludge, food waste and their mixture for enhanced bioenergy recovery and waste volume reduction via anaerobic digestion. Applied Energy, 2016. 179: p. 1131-1137.
[69] Taherzadeh, M.J. and K. Karimi, Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. International journal of molecular sciences, 2008. 9(9): p. 1621-1651.
[70] Hendriks, A. and G. Zeeman, Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource technology, 2009. 100(1): p. 10-18.
[71] Persson, M. and A. Wellinger, Biogas upgrading and utilisation. IEA Bioenergy, 2006.
[72] Kapoor, R. and V. Vijay, 5.2 Evaluation of existing low cost gas bottling systems for vehicles use adaption in developing economies. Public deliverable EU FP7 VALORGAS project (grant agreement no. 241334), 2013.

[73] McCormick, K. and T. Kåberger, Exploring a pioneering bioenergy system: The case of Enköping in Sweden. Journal of Cleaner production, 2005. 13(10-11): p. 1003-1014.
[74] Tomescu, M., Innovative bioenergy systems in action: the case of the Mureck bioenergy cycle. International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund (Study prepared for the Bioenergy Network of Excellence), 2005.
[75] Wheeler, P., et al. Biogas Upgrading and Utilisation IEA. in Bioenergy. 1999.
[76] Breverton, T., Breverton's Encyclopedia of Inventions. 2013: Quercus.
[77] Weiland, P., Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. Applied biochemistry and biotechnology, 2003. 109(1-3): p. 263-274.
[78] Poeschl, M., S. Ward, and P. Owende, Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. Renewable and sustainable energy reviews, 2010. 14(7): p. 1782-1797.
[79] Yliopisto, J., Evaluation of potential technologies and operational scales reflecting market needs for low-cost gas upgrading systems. Seventh framework programme theme energy, Biowaste as feedstock for 2nd generation, 2009.
[80] Hagen, M., et al., Adding gas from biomass to the gas grid. Contract No: XVII/4.1030, 2001(99-412).
[81] Wheless, E. and J. Pierce. Siloxanes in landfill and digester gas update. in Proceedings of the 27th SWANA Landfill Gas Symposium. San Antonio, TX: Silver Springs. 2004.
[82] Abatzoglou, N. and S. Boivin, A review of biogas purification processes. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2009. 3(1): p. 42-71.
[83] Cosoli, P., et al., Hydrogen sulphide removal from biogas by zeolite adsorption: Part I. GCMC molecular simulations. Chemical Engineering Journal, 2008. 145(1): p. 86-92.
[84] Fischer, M.E., Biogas purification: H2S removal using biofiltration. 2010, University of Waterloo.
[85] Khanal, S.K., Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications. 2011: John Wiley & Sons.
[86] Gadre, R., Removal of hydrogen sulfide from biogas by chemoautotrophic fixed-film bioreactor. Biotechnology and bioengineering, 1989. 34(3): p. 410-414.
[87] Petersson, A. and A. Wellinger, Biogas upgrading technologies–developments and innovations. IEA bioenergy, 2009. 20: p. 1-19.
[88] Ryckebosch, E., M. Drouillon, and H. Vervaeren, Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and bioenergy, 2011. 35(5): p. 1633-1645.
[89] Thrän, D., et al., Biomethane–status and factors affecting market development and trade (No. IEA Task 40 and Task 37 Joint Study. September 2014.). IEA Bioenergy, 2014.
[90] Kaparaju, P. and S.R. andJukka Rintala, Biogas upgrading and compression. Bioenergy Production by Anearobic Digestion2013, 2013: p. 152-82.
[91] López, M.E., et al., Biogas technologies and cleaning techniques, in Environmental Chemistry for a Sustainable World. 2012, Springer. p. 347-377.
[92] De Hullu, J., et al., Comparing different biogas upgrading techniques. Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2008.
[93] Zhao, Q., et al., Purification technologies for biogas generated by anaerobic digestion. Compressed Biomethane, CSANR, Ed, 2010. 24.

[94] Palmeri, N., S. Cavallaro, and J. Bart, Carbon dioxide absorption by MEA: A preliminary evaluation of a bubbling column reactor. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2008. 91(1): p. 87-91.
[95] Baker, R.W. and K. Lokhandwala, Natural gas processing with membranes: an overview. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008. 47(7): p. 2109-2121.
[96] Stewart, M. and K. Arnold, Gas sweetening and processing field manual. 2011: Gulf Professional Publishing.
[97] Al Seadi, T., Biogas handbook. 2008.
[98] Baek, G., et al., Treatment of cattle manure by anaerobic co-digestion with food waste and pig manure: Methane yield and synergistic effect. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020. 17(13): p. 4737.
[99] STRABAG Umwelttechnik GmbH plant engineering and construction, I.B.P., Technical Proposal, mass balance, 2017.
[100] Esposito, G., et al., Modelling the effect of the OLR and OFMSW particle size on the performances of an anaerobic co-digestion reactor. Process Biochemistry, 2011. 46(2): p. 557-565.
[101] Wang, X. and Y.-c. Zhao, A bench scale study of fermentative hydrogen and methane production from food waste in integrated two-stage process. International journal of hydrogen energy, 2009. 34(1): p. 245-254.
[102] Ariunbaatar, J., et al., Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. Applied energy, 2014. 123: p. 143-156.
[103] Tsydenova, N., et al., Feasibility and Barriers for Anaerobic Digestion in Mexico City. Sustainability, 2019. 11(15): p. 4114.
[104] Morero, B., R. Vicentin, and E.A. Campanella, Assessment of biogas production in Argentina from co-digestion of sludge and municipal solid waste. Waste Management, 2017. 61: p. 195-205.
[105] Hitachi Zosen Inova, T.P., Process Description, 2017.
[106] Beijing Yingherui Environmental Technology Co., L., Proforma Invoice, 2020.
[107] Raju, K., Fluid mechanics, heat transfer, and mass transfer: chemical engineering practice. 2011: John Wiley & Sons.
[108] Appels, L., et al., Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in energy and combustion science, 2008. 34(6): p. 755-781.
[109] Frischmann, P., Enhancement and treatment of digestates from anaerobic digestion. A review of enhancement techniques, processing options and novel digestate products Project code: OMK006-002 Research date: Feb, 2012.
[110] Turovskiy, I.S. and P. Mathai, Wastewater sludge processing. 2006: John Wiley & Sons.
[111] Press, B.F., Technology Fact Sheet. 2000.
[112] Zicari, S.M., Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost. 2003, Cornell University.
[113] Naqi, A., Conversion of Biomass to Liquid Hydrocarbon Fuels via Anaerobic Digestion: A Feasibility Study. 2018.

۹- فصل اول : معرفی نیروگاه بیوگاز

۹-۱- مقدمه

پیش از آن‌که ملاحظات احداث نیروگاه هضـــم بیهوازی (رویه احداث نیروگاه بیوگاز در مجتمع‌های کشـــاورزی و دامپروری) مورد بررسی قرار گیرد لازم است ابتدا مبانی فن‌آوری هضم بی‌هوازی و اجزاء یک نیروگاه بیوگاز معرفی شود. یک نیروگاه بیوگاز از بخش‌های مختلفی تشکیل می‌شود که در این فصل، یک دسته‌بندی کلی از نیروگاه‌های بیوگاز (هضم بی‌هوازی) ارائه می‌شود. در ارائه دسته‌بندی نیروگاه‌های هضم بی‌هوازی از مصوبات کارگروه حمایت از بومی‌ســازی فن‌آوری نیروگاه‌های تجدیدپذیر (در بخش نیروگاه‌های زیســت‌توده) ســازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) استفاده شـده اسـت. مطابق مصـوبات کارگروه زیسـت‌توده، یک نیروگاه بیوگاز (هضـم بی‌هوازی) شامل بخش‌های اصلی زیر است که در ادامه فصل، به معرفی و بررسی هر بخش پرداخته می‌شود:

- بخش پردازش خوراک ورودی
- بخش تولید، ذخیره‌سازی و پالایش بیوگاز
- بخش فرآورش فرآورده‌های جانبی
- بخش پایش و کنترل
- بخش تولید انرژی

۹-۲- پیش‌بینی سهم انرژی زیستی در سبد انرژی دنیا

در بیان ســـهم انرژی‌های تجدیدپذیر در آینده انرژی دنیا اهداف مختلفی تعریف و مد نظر قرار می‌گیرد. در آخرین گزارش منتشرشده توسط آژانس بین‌المللی انرژی[1] در سال ۲۰۲۱، هدف دستیابی به انتشار صفر[2] مد نظر قرار گرفته است. در فصل دوم این گزارش به ۷ رکن اصلی کربن‌زدایی اشاره شده است: ۱) بهره‌وری انرژی؛ ۲) تغییر رفتار؛ ۳) برقی‌سـازی؛ ۴) انرژی‌های تجدیدپذیر؛ ۵) هیدروژن و سـوخت‌های مبتنی بر هیدروژن؛ ۶) انرژی زیسـتی؛ ۷) جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن [۱].

همان طور که ملاحظه می‌شـود در کنار رکن انرژی‌های تجدیدپذیر، رکن انرژی زیسـتی به طور مسـتقل مورد تأکید قرار گرفته اسـت و این امر حاکی از اهمیت نقش انرژی زیسـتی در آینده انرژی دنیا و حساب ویژه‌ای است که روی این منبع انرژی تجدیدپذیر جهت کاهش انتشار می‌شود.

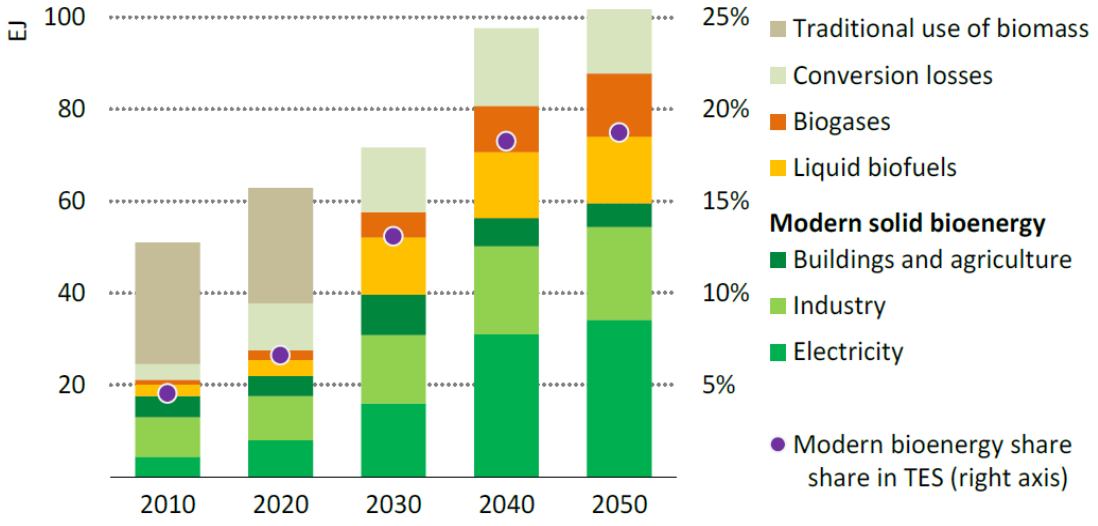
تقاضای اولیه جهانی برای انرژی زیستی تقریباً ۶۵ EJ در سال ۲۰۲۰ بوده است که حدود ۹۰٪ آن زیست‌توده جامد بوده است. حدود ۴۰٪ از زیست‌توده جامد در روش‌های طبخ سنتی استفاده شده است. استفاده از زیست‌توده جامد به این روش تا سال ۲۰۳۰ در NZE برای رسیدن به هدف هفتم توسعه پایدار سازمان ملل به صفر می‌رسد. با افزایش تولید از کمتر از ۴۰ EJ در سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۰۰ EJ در سال ۲۰۵۰، افزایش در همه اشکال انرژی زیستی مدرن

[1] International Energy Agency (IEA)
[2] Net Zero Emission (NZE)

بیشتر از حد جبران استفاده سنتی زیست‌توده جامد است [۱]. در شکل (۱-۱)، سهم انرژی زیستی در تأمین انرژی مورد نیاز بخش‌های مختلف جهت تحقق هدف NZE نمایش داده شده است.

استفاده از انرژی زیستی جامد مدرن سالانه به طور متوسط حدود ۳٪ تا سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. در بخش برق، جایی که تقاضا به ۳۵ EJ در سال ۲۰۵۰ می‌رسد، انرژی زیستی جامد برای تولید برق با انتشار کم و انعطاف‌پذیر در کنار تولید برق از پنل خورشیدی و باد (برق مکل) مورد استفاده قرار می‌گیرد و در صورتی که به همراه واحد جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن مورد استفاده قرار گیرد باعث حذف CO_2 از جو می‌شود. در سال ۲۰۵۰، تولید برق با استفاده از سوخت‌های زیستی به ۳۳۰۰ TWh یا ۵٪ از کل تولید می‌رسد. انرژی زیستی همچنین حدود ۵۰٪ از تولید گرمایش منطقه‌ای را تأمین می‌کند [۱].

در بخش صنعت، جایی که تقاضا در سال ۲۰۵۰ به ۲۰ EJ می‌رسد، انرژی زیستی جامد گرما با دمای بالا را تأمین می‌کند و می‌تواند برای کاهش شدت انتشار نیروگاه‌های موجود با زغال سنگ سوزانده شود. بیشترین تقاضا برای تولید کاغذ و سیمان است: در سال ۲۰۵۰، انرژی زیستی ۶۰٪ تقاضای انرژی در بخش کاغذ و ۳۰٪ تقاضای انرژی برای تولید سیمان را برآورده می‌کند. تقاضا برای انرژی زیستی جامد مدرن در ساختمان‌ها به حدود ۱۰ EJ در سال ۲۰۳۰ افزایش می‌یابد، که بیشتر آن برای استفاده در اجاق‌های آشپزی پیشرفته است زیرا قرار است تا سال ۲۰۳۰ استفاده سنتی از زیست‌توده حذف گردد. در اقتصادهای پیشرفته هم از انرژی زیستی به طور فزاینده‌ای برای گرمایش فضا و آب استفاده می‌شود [۱].



شکل (۹-۱) سهم انرژی زیستی در تأمین انرژی مورد نیاز بخش‌های مختلف جهت تحقق هدف NZE [۱]

هاضم‌های بیوگاز خانگی و روستایی در مناطق روستایی منبع انرژی تجدیدپذیر و پخت و پز پاک را برای نزدیک به ۵۰۰ میلیون خانوار تا سال ۲۰۳۰ در هدفگذاری NZE فراهم می‌کنند و کل استفاده از بیوگاز به ۵/۵ EJ در سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد (از کمتر از ۲ EJ در سال ۲۰۲۰). در بسیاری از مناطق دنیا تا سال ۲۰۵۰ به لطف صدور مجوزهای تزریق بیومتان به شبکه‌های گاز، با متوسط نرخ تزریق بالای ۸۰ درصد، تقاضا برای بیومتان به ۸/۵ EJ افزایش می‌یابد. نیمی از کل استفاده بیومتان در بخش صنعت است، جایی که بیومتان جایگزین گاز طبیعی به عنوان

منبع تأمین گرما در فرایندها می‌گردد. هر کدام از بخش‌های ساختمان و حمل و نقل بیشتر از حدود ۲۰٪ مصرف بیومتان در سال ۲۰۵۰ را به خود اختصاص می‌دهند [۱].

یکی از مزایای اصلی انرژی زیستی این است که می‌تواند از زیرساخت‌های موجود استفاده کند. به عنوان مثال، از خطوط لوله گاز طبیعی و تجهیزات مصرف‌کننده نهایی می‌توان برای بیومتان استفاده کرد و برای بسیاری از سوخت‌های زیستی مایع می‌توان از شبکه‌های توزیع نفت موجود استفاده کرد و فقط با تغییرات جزئی یا محدود، از آنها در وسایل نقلیه استفاده کرد. گاز مایع زیستی[1]– گاز مایع که از مواد اولیه تجدیدپذیر تولید می‌شود– با گاز مایع معمولی یکسان است و بنابراین می‌توان آن را به همان روش مخلوط و توزیع کرد. تأمین انرژی زیستی به شکل پایدار منبع ارزشمندی برای اشتغال و درآمدزایی در جوامع روستایی فراهم می‌کند، بار وظایف ناخواسته بر دوش زنانی که معمولاً وظیفه جمع‌آوری سوخت را بر عهده دارند کاهش می‌دهد، از طریق کاهش آلودگی هوا و مدیریت صحیح پسماند باعث سلامتی جوامع روستایی می‌گردد و انتشار متان از طریق احتراق نامناسب و تجزیه پسماند را کاهش می‌دهد [۱].

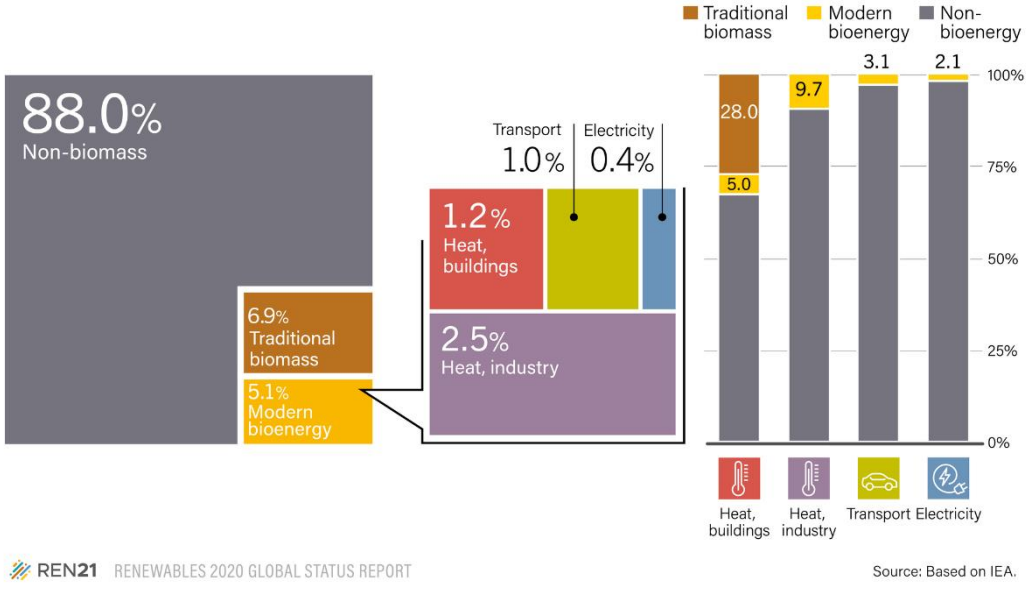
مصرف سوخت زیستی مایع از ۱/۶ میلیون بشکه معادل نفت خام در روز در سال ۲۰۲۰ به ۶ میلیون بشکه معادل نفت خام در روز در سال ۲۰۳۰ در هدفگذاری NZE افزایش می‌یابد، که عمدتاً در حمل و نقل جاده‌ای استفاده می‌شود. پس از سال ۲۰۳۰، سوخت‌های زیستی مایع با سرعت کمتری رشد می‌کنند و در سال ۲۰۵۰ به حدود ۷ میلیون بشکه معادل نفت خام در روز می‌رسند و با تسلط بیشتر برق بر حمل و نقل جاده‌ای، استفاده از آنها به سمت حمل و نقل هوایی و دریایی سوق پیدا می‌کند. تقریباً نیمی از سوخت‌های زیستی مایع در سال ۲۰۵۰ برای حمل و نقل هوایی استفاده می‌شود، جایی که نفت سفید زیستی حدود ۴۵٪ کل مصرف سوخت در هواپیماها را تشکیل می‌دهد [۱].

انرژی زیستی بهمراه جذب و ذخیره کربن[2] نقشی اساسی در هدفگذاری NZE برای جبران انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌هایی دارد که دستیابی به حذف کامل انتشار در آنها بسیار دشوار است. در سال ۲۰۵۰ ، حدود ۱۰٪ از انرژی زیستی کل در تأسیسات مجهز به سیستم جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن استفاده می‌شود و حدود ۱.۳ گیگا تن CO_2 با استفاده از این روش جذب می‌شود. حدود ۴۵٪ از این CO_2 در بخش تولید سوخت‌های زیستی، ۴۰٪ در بخش برق و مابقی در صنایع سنگین، به ویژه تولید سیمان، جذب می‌شود [۱].

در حالت کلی استفاده از انرژی زیستی[3] به دو دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شود: "استفاده سنتی" و "استفاده مدرن". استفاده سنتی به سوزاندن زیست‌توده در اشکالی مانند چوب، فضولات دامی و زغال سنتی گفته می‌شود. فناوری‌های انرژی زیستی مدرن شامل سوخت‌های مایع تولیدشده از باگاس نیشکر و سایر گیاهان، پالایشگاه‌های زیستی[4]، بیوگاز تولیدشده از هضم بی‌هوازی مواد زائد، سیستم‌های گرمایشی پلت‌سوز چوبی و فناوری‌های دیگر است [۲].

حدود سه چهارم از مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیا را انرژی زیستی دربر می‌گیرد که بیشتر از نیمی از این مقدار شامل مصرف سنتی انرژی زیستی می‌شود. حدود ۱۲ درصد از کل مصرف انرژی نهایی و حدود ۲/۱ درصد از تولید برق در جهان در سال ۲۰۱۸ مربوط به انرژی زیستی بوده است. در شکل (۱–۲)، سهم تقریبی انرژی زیستی از مصرف انرژی نهایی کل ارائه شده است [۳].

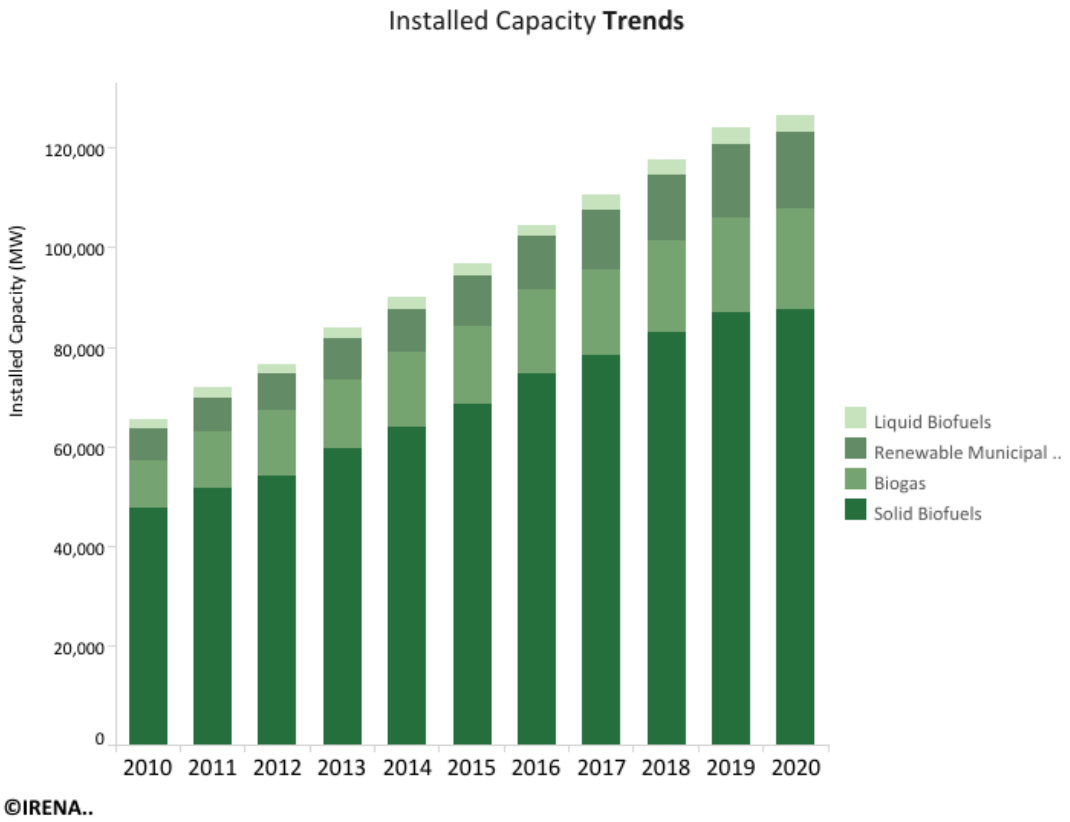
[1] BioLPG
[2] BioEnergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)
[3] Bioenergy
[4] Biorefinery



شکل (۹-۲) سهم تقریبی انرژی زیستی از مصرف انرژی نهایی کل [۳]

زیست‌توده پتانسیل قابل توجهی برای افزایش تأمین انرژی در کشورهای پرجمعیت مانند برزیل، هند و چین دارد که با افزایش تقاضا مواجه هستند. زیست‌توده را می‌توان مستقیماً برای تولید برق یا حرارت سوزاند یا می‌توان آن را جایگزین نفت یا گاز کرد. سوخت‌های زیستی مایع، به عنوان جایگزین تجدیدپذیر مناسب برای بنزین، عمدتاً در بخش حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

برزیل، پیشتاز در سوخت‌های زیستی مایع است و دارای بزرگترین ناوگان وسایل نقلیه از نظر تنوع سوخت است که می‌توانند با بیواتانول- الکلی که معمولاً از تخمیر کربوهیدرات‌های موجود در محصولات شکر یا نشاسته، مانند ذرت، نیشکر یا ذرت خوشه‌ای شیرین تولید می‌شود- کار کنند [۲]. در شکل (۱-۳)، روند ظرفیت نصب‌شده انرژی زیستی در دنیا نمایش داده شده است [۲].



شکل (۹-۳) روند ظرفیت نصب‌شده انرژی زیستی در دنیا [۲]

۹-۳- وضعیت انرژی زیست‌توده در ایران

زیست‌توده یکی از منابع عمده در میان انواع منابع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. تعاریف متعدد و گوناگونی از این منابع شده است. بر اساس تعاریف موجود در دستورالعمل EC/2001/77، "زیست‌توده عبارت است از بخش قابل تجزیه زیستی از محصولات، ضایعات و زائدات کشاورزی (شامل مواد گیاهی و حیوانی)، جنگل‌داری و صنایع وابسته و همچنین بخش قابل تجزیه زیستی پسماندهای صنعتی و شهری" [۴].

با این تعریف منابع اصلی زیست‌توده به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند: ۱) ضایعات و زائدات محصولات بخش کشاورزی (زراعی و باغی)؛ ۲) فضولات و فاضلاب بخش دامداری و دامپروری؛ ۳) پسماند جامد شهری (شامل بخش فسادپذیر و بخش غیرفسادپذیر)؛ ۴) فاضلاب شهری؛ ۵) پساب و فاضلاب صنایع (مواد غذایی و ...)؛ ۶) محصولات انرژی‌زا؛ ۷) زائدات چوبی (منابع جنگلی و صنایع وابسته).

بر اساس این دسته‌بندی و در صورت در اختیار داشتن منابع اطلاعاتی کافی و دقیق، می‌توان پتانسیل منابع زیست‌توده در کشور را محاسبه و قابلیت تولید انرژی در اشکال مختلف (برق، حرارت، سوخت، مواد شیمیایی و ...) را

برآورد نمود. از آنجایی که تعیین پتانسیل منابع زیست‌توده متولی مشخصی در کشور ندارد، همچنین اطلاعات مربوط به پتانسیل منابع زیست‌توده که عمدتاً در سایت سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) قابل دسترسی است، در قالب تصویر می‌باشد لذا، اطلاعات این بخش از مطالعات پژوهشگاه نیرو در سال ۱۳۹۵ در پروژه "تدوین سند راهبرد ملی و نقشه راه توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی زیست‌توده در ایران" اقتباس گردیده است [۵]. در جداول (۱-۱) و (۱-۲)، پتانسیل تئوری منابع زیست‌توده ایران و قابلیت تولید برق از آنها با استفاده از دو فناوری هضم بی‌هوازی و گازیسازی ارائه شده است.

جدول)۹-۱(پتانسیل تئوری و عملی تولید برق از منابع زیست‌توده در ایران به کمک فرایند هضم بی‌هوازی [۵]

منبع زیست‌توده		میزان منبع		حداکثر توان برق تولیدی	
		(میلیون تن در سال)		(MW)	
		پتانسیل تئوری	پتانسیل عملی	پتانسیل تئوری	پتانسیل عملی
زائدات و ضایعات کشاورزی باغی	ضایعات باغی	۲/۲۵	۱	۲۹	۱۵
	زائدات برگی	۲/۴۴	۱	۱۷۴	۸۷
محصولات و زائدات کشاورزی زراعی		۱۱۳/۹۵	۱۳	۸۸۶۴	۲۵۶
فضولات دام و طیور		۷۸/۶۲	۴۰	۸۳۹	۴۱۹
زباله جامد شهری	بخش تر	۱۲/۶۵	۱۲	۵۲۴	۴۹۸
لجن فاضلاب شهری		۲۳/۳۷	۱۷	۶۱	۴۵
مجموع		۲۲۳/۲۸	۸۵	۱۰۴۹۰	۱۸۵۲

جدول)۹-۲(پتانسیل تئوری و عملی تولید برق از منابع زیست‌توده در ایران به کمک فرایند گازیسازی [۵]

منبع زیست‌توده		میزان منبع		حداکثر توان برق تولیدی	
		(میلیون تن در سال)		(MW)	
		پتانسیل تئوری	پتانسیل عملی	پتانسیل تئوری	پتانسیل عملی
زائدات کشاورزی باغی	زیست‌توده چوبی	۴/۳۴	۲/۱۷	۴۷۵	۲۳۸
زائدات کشاورزی زراعی		۵/۳۷	۰	۵۸۸	۰
زیست‌توده جنگلی		۲/۱۸	۱/۰۹	۲۳۹	۱۱۹
زباله جامد شهری	بخش خشک	۵/۱۲	۴/۸۷	۵۶۱	۵۳۳

لجن فاضلاب شهری		۰/۹۸	۰/۷۲	۹۴	۶۹
مجموع		۱۷/۹۹	۸/۸۵	۱۹۵۸	۹۶۰

در شکل (۱-۴)، پتانسیل استان‌های کشور در تولید انرژی از منابع زیست‌توده نمایش داده شده است. در این شکل، آیکون‌های تیره‌تر نشان‌دهنده ظرفیت بیشتر برای آن منبع خاص می‌باشد [۶].



شکل (۹-۴) پتانسیل فضولات دامی، زائدات کشاورزی، پسماند شهری و زائدات جنگلی در استان‌های مختلف کشور [۶]

تا سال ۱۴۰۰ ظرفیت نصب‌شده از انواع منابع زیست‌توده در مقیاس نیروگاهی در جدول (۱-۳) ارائه شده است [۷].

جدول)۹-۳(موقعیت، ظرفیت و نوع نیروگاه‌های زیست‌توده نصب و بهره‌برداری‌شده در ایران [۷]

محل نیروگاه		سال احداث	ظرفیت نامی (MW)	نوع نیروگاه
استان	شهر			
فارس	شیراز	۲۰۰۹	۱/۰۶	محل دفن پسماند
خراسان رضوی	مشهد	۲۰۰۹	۰/۶	محل دفن پسماند

تهران	کهریزک	۲۰۱۶	۳	زباله‌سوز
	آبعلی	۲۰۱۶	۲	هاضم بی‌هوازی
	شهرری	۲۰۱۶	۴	هاضم بی‌هوازی

۹-٤- معرفی نیروگاه بیوگاز

بیوگاز در نتیجه تجزیه مواد آلی در یک محیط بی‌هوازی تولید می‌شود. به عنوان مثال، در محل دفن زباله، به صورت طبیعی در بدن انسان و در هاضم‌های بی‌هوازی از تجزیه مواد آلی، بیوگاز تولید می‌شود. هضم بی‌هوازی به تجزیه مواد آلی در غیاب اکسیژن گفته می‌شود. ترکیب گازی که از یک هاضم متصاعد می‌شود معمولاً بیوگاز نامیده می‌شود. به مواد جامد و مایع سرشار از مواد مغذی باقیمانده هم مواد هضم‌شده گفته می‌شود. هضم بی‌هوازی یکی از روش‌های اثبات‌شده برای تبدیل مواد آلی به بیوگاز و مواد هضم‌شده می‌باشد. هضم بی‌هوازی در حال تبدیل شدن به یک گزینه بازیافت مردم‌پسند است که با کمک آن می‌توان از مواد آلی دورریز انرژی، کمپوست و مواد مغذی تولید کرد و انتشار متان که یکی از گازهای گلخانه‌ای مخرب است، را کنترل کرد.

بدین ترتیب، نیروگاه بیوگاز به مکانی گفته می‌شود که در آن، خوراک ورودی مناسب به نیروگاه در مخازن هضم بی‌هوازی، تجزیه شده و به بیوگاز و مواد هضم‌شده تبدیل می‌شوند. از بیوگاز تولیدشده برای مصارف مختلف از جمله تولید برق، حرارت و سوخت استفاده می‌شود. واحدهای هضم بی‌هوازی انواع، شکل‌ها و پیکربندی‌های مختلفی دارند که اشتراک همه آنها این است که در غیاب اکسیژن، در یک محیط عایق و در دمای بالا کار می‌کنند. در مقیاس بزرگ، نیروگاه‌های استحصال بیوگاز به دو شکل دسته‌بندی می‌شوند: ۱) نیروگاه استحصال بیوگاز از محل دفن پسماند؛ ۲) نیروگاه استحصال بیوگاز به روش هضم بی‌هوازی.

نیروگاه‌های بیوگاز بسته به نوع خوراک، جغرافیا و اقلیم محل احداث، ملاحظات فنی-اقتصادی-اجتماعی-محیط زیستی و سایر ملاحظات دارای انواع، شکل‌ها و پیکربندی‌های مختلفی هستند. اما به طور کلی می‌توان بخش‌های اصلی نیروگاه‌های استحصال بیوگاز به روش هضم بی‌هوازی را به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- بخش پردازش خوراک ورودی
  - تجهیزات کاهش اندازه
  - تجهیزات غربالگری
  - تجهیزات انتقال مواد
  - پیش‌فرآورش
- بخش تولید، ذخیره‌سازی و پالایش بیوگاز
  - راکتور و ملحقات
  - سیستم ذخیره‌سازی بیوگاز
  - سیستم پالایش بیوگاز
  - فلر
- بخش فرآورش فرآورده‌های جانبی

- سامانه انباشت و گندزدایی
- سامانه فرآورش نهایی

❑ بخش پایش و کنترل

- مرکز راهبری و فرمان
- سیستم پایش

❑ بخش تولید انرژی

- موتور
- ژنراتور
- سامانه بازیابی حرارت

در شکل زیر نمایی از یگ نیروگاه تولید بیوگاز به روش هضم بی‌هوازی ارائه شده است.





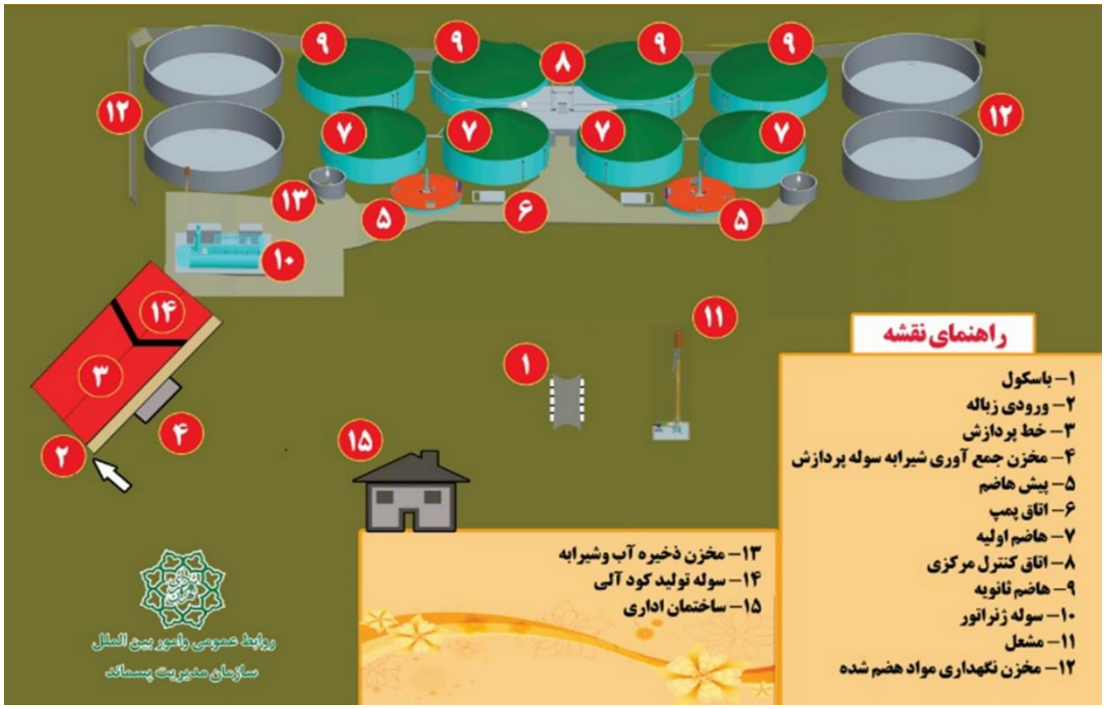








شکل (۹–۵) چند نما از نیروگاه تولید بیوگاز به روش هضم بی‌هوازی



شکل (۹-۶) نقشه چیدمان سایت تأسیسات هضم بی‌هوازی شهر تهران

۱۰- فصل دهم : ملاحظات فنی احداث نیروگاه بیوگاز

۱۰-۱- مقدمه

از کار افتادن یا کارکرد نامطلوب واحدهای بیوگاز عمدتاً به دلیل اشـــتباهات در فاز برنامه‌ریزی رخ می‌دهد. عواقب چنین اشـتباهاتی ممکن اسـت بلادرنگ آشـکار شـده یا ممکن اسـت پس از گذشـت چندین سـال خود را نشـان دهد. بنابراین، برنامه‌ریزی جامع و دقیق برای برطرف کردن اشـتباهات پیش از آن که به مراحل غیرقابل بازگشـت برسـند، بی‌نهایت حائز اهمیت است.

احداث یک نیروگاه بیوگاز یک سرمایه‌گذاری گران است و نباید دیدگاه راه‌اندازی موقت به آن داشت. بنابراین، تعیین معیارهای مکان‌یابی برای پایدار بودن نیروگاه بیوگاز، گام‌های اولیه مهم در فاز برنامه‌ریزی محسوب می‌شوند.

یکی از مشکلات مشـترک برای مهندسین در فاز برنامه‌ریزی، مداخله مشـتریان در زمان برنامه‌ریزی اسـت. به همان اندازه که خواسـته‌ها و توقعات مشـتریان باید در نظر گرفته شـود، مهمترین وظیفه یک برنامه‌ریز، پایه‌گذاری کردن یک واحد بیوگاز اسـت که به خوبی کار می‌کند. از آن جایی که در بیشـتر موارد مشـتریان تجربه‌ای از فناوری بیوگاز ندارند، برنامه‌ریز وظیفه دارد تمام دلایل هر گام از برنامه‌ریزی را برای مشـــتری توضـــیح دهد. اگر خواســـته‌های مشتریان پرهزینه و بی‌فایده باشد، برنامه‌ریزان باید شجاعت خارج شدن از فرایند برنامه‌ریزی را داشته باشند.

علاوه بر این، هر گونه توصیه در قالب خدمات ترویجی مربوط به نیروگاه‌های بیوگاز باید با تخمینی از نیازهای کمی و کیفی انرژی طرف ذینفع آغاز شـود. در ادامه، پتانسـیل تولید بیوگاز باید بر پایه میزان تولید زیسـت‌توده مشـخص، محاسبه شده و با تقاضای انرژی مقایسه شود. با این وجود، هم تقاضای انرژی و هم پتانسیل تولید بیوگاز متغیرهایی هستند که در فاز برنامه‌ریزی نمی‌توان آنها را بادقت تعیین کرد. تعیین اندازه نیروگاه (هاضم، مخزن نگهداری بیوگاز و موارد دیگر) گام بعدی در فرایند برنامه‌ریزی است.

اگر قرار اسـت نیروگاه بیوگاز در مقیاس خانگی عمدتاً به عنوان منبعی برای تأمین انرژی باشـد، اجرای آن تنها زمانی توصیه می‌شود که قادر باشد تقاضای انرژی محاسبه‌شده را تأمین کند.

پیش از آغاز سـاخت نیروگاه بیوگاز، مقتضـیات مختلفی وجود دارد که باید در نظر گرفته شـود. به عنوان مثال، شـرایط طبیعی و کشاورزی در کشورهای خاص به اندازه جنبه‌های اجتماعی یا اقتصادی حائز اهمیت هستند.

در سراسر دنیا، تعداد بیشماری طراحی از نیروگاه‌های بیوگاز تحت شرایط اقلیمی و شرایط اجتماعی–اقتصادی خاص توسـعه یافته اسـت. انتخاب نوع طراحی در اصـل بخشـی از فرایند برنامه‌ریزی اسـت. با این وجود، آشـنا بودن با ملاحظات طراحی پایه پیش از آن که فرایند برنامه‌ریزی در عمل آغاز شـود حائز اهمیت اسـت. این مورد هم مربوط به برنامه‌ریزی برای یک واحد بیوگاز و هم مربوط به برنامه‌ریزی برای برنامه‌های بیوگاز در گســـتره یک منطقه می‌شود.

اجرای یک پروژه بیوگاز شـامل تمام مراحل کار از تدوین کردن مفهوم، مطالعات امکان‌سـنجی و مهندسـی نیروگاه تا شروع به کار نیروگاه می‌شود. در شکل زیر، مراحل اجرای یک نیروگاه بیوگاز نمایش داده شده است.



شکل (۱۰-۱) مراحل اجرای پروژه تولید و بکارگیری بیوگاز [۳۱]

۱۰-۲- تدوین کردن مفهوم و طرح کلی پروژه

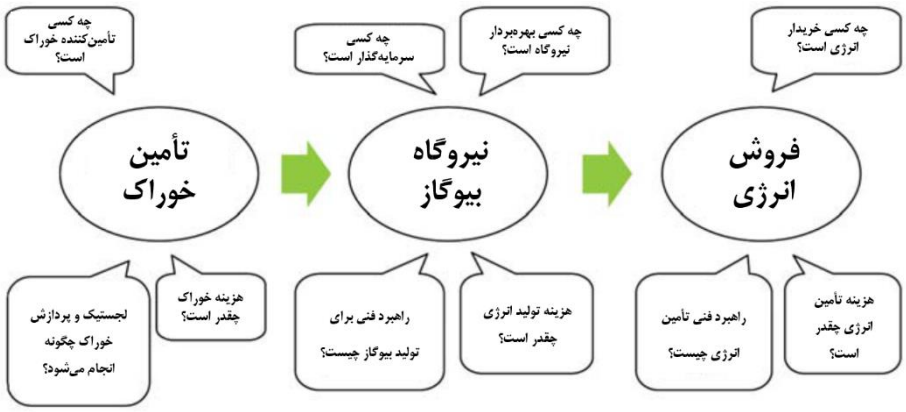
بعد از این که ایده اجرای یک نیروگاه بیوگاز شکل گرفت، لازم است طرح کلی پروژه[1] به عنوان پایه و اساس فرایند اجرای پروژه ترسیم شود. طرح کلی پروژه مبنایی برای ارزیابی پروژه نیز محسوب می‌شود. طرح کلی پروژه نه تنها برای ارزیابی امکان‌سنجی فنی ویژه ساختگاه، بلکه برای چگونگی تأمین مالی و واجد شرایط بودن پروژه برای دریافت یارانه دولتی هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. تهیه طرح کلی پروژه برای برقراری ارتباطات کلیدی اولیه با شرکت‌های مهندسی هم مفید است. توصیه می‌شود برخی از اطلاعات اولیه در مورد روال برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از یک نیروگاه بیوگاز از اپراتورهای نیروگاه‌های بیوگاز موجود گرفته شود، به خصوص اگر بنا بر این باشد که از خوراک‌های یکسانی استفاده شود.

در یک پروژه بیوگاز آنچه حائز اهمیت است این است که پروژه به صورت کامل- شامل در دسترس بودن خوراک، خود نیروگاه بیوگاز و تأمین انرژی برای خریداران- در نظر گرفته شود. سه جنبه اصلی که در شکل زیر نشان داده شده است از همان ابتدا باید با جزئیات یکسان در نظر گرفته شوند و هدف این است که ارزیابی اولیه مستدلی از مفهوم پروژه انجام شود.

[1] Project Outline

برای آن که در فازهای بعدی برنامه‌ریزی از بروز مشـکلات جلوگیری شـود، لازم اسـت طرح کلی پروژه مطابق با مراحل زیر تهیه شده و با استفاده از روش‌های محاسباتی موجود، مورد ارزیابی قرار گیرد:

۱- محاسبه و بررسی حجم موجود از خوراک اولیه؛ تعیین زنجیره تأمین زیست‌توده
۲- طراحی فنی تقریبی نیروگاه
۳- بررسی مساحت موجود زمین
۴- برآورد هزینه‌ها، واجد شرایط بودن برای دریافت رایانه دولتی و سودآوری اقتصادی
۵- بررسی راهبرد فروش انرژی
۶- بررسی امکان اخذ مجوز رسمی لازم و انطباق آن با تأییدیه‌های محلی



شکل (۱۰-۲) رویکرد کلی در یک پروژه نیروگاه بیوگاز [۳۱]

برای انجام ارزیابی اولیه یک پروژه، نیازی به تصـمیم‌گیری قطعی در مورد جنبه‌های فوق نیسـت (این امر در فاز برنامه‌ریزی بعدی انجام خواهد شد). در عوض، هدف این است که اطمینان حاصل شود که حداقل یک یا در صورت امکان چندین گزینه برای موفقیت پروژه وجود دارد.

مرحله ۱: تهیه طرح کلی پروژه

دسـترسـی به خوراک را در بلندمدت مورد بررسی قرار دهید

- کدام خوراک‌ها در بلندمدت در دسترس خواهد بود؟
- آیا برنامه‌های میان‌مدت / بلندمدت برای تغییر کشت وجود دارد؟
- این مورد چگونه نیروگاه بیوگاز را تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ (از نظر بیولوژی، مواد، فرایند، انرژی)
- آیا در بلندمدت، امکان تأمین خوراک از بیرون وجود دارد؟
- از نظر الزامات قانونی، آیا استفاده از این خوراک‌ها ارزشمند است؟ (مسأله تناسب)

از چند نیروگاه بازدید کنید

- یکی از روش‌های کسـب تجربه و جمع‌آوری اطلاعات، بازدید از نیروگاه‌های بیوگاز موجود است.
- چه گزینه‌های ساختاری در بازار وجود دارد؟
- مشکلات ساختاری / مربوط به فرایند در کجا وجود دارد؟

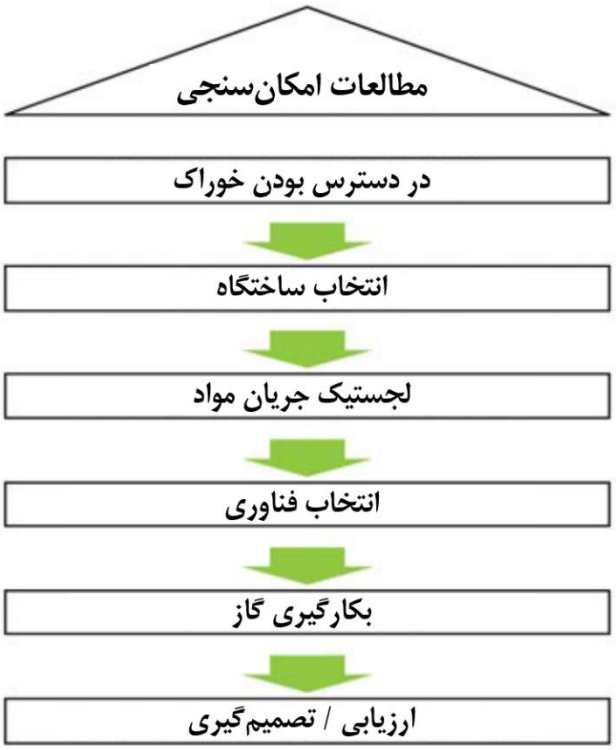
	▪ آن مشکلات چگونه حل شدند؟ ▪ تجربه اپراتورهای نیروگاه‌های موجود با اجزاء مختلف و ترکیبات خوراک چگونه بوده است؟
مشـــخص کنید چه مقدار زمان در اختیار دارید	▪ مشـــخص کنید که روزلنه چه مقدار زمان برای انجام کارهای روزمره بازرســـی / تعمیرات و نگهداری لازم است؟ ▪ آیا این زمان با شرایط کاری شما در زمین کشاورزی سازگاری دارد؟ ▪ کدام مدل کاری برای خانواده شـما مناسـب اسـت؟ (به عنوان مثال، بعد از شـما چه کسی عهده‌دار زمین کشاورزی خواهد شد) ▪ آیا نیاز است کارگرانی از بیرون به خدمت گرفته شوند؟
بررســـی کنید چگونه می‌توانید از گرمای حاصل از نیروگاه استفاده کنید	▪ آیا خریداران بالقوه انرژی گرمایشی در نزدیکی شما وجود دارند؟ ▪ هر ماه چه میزان گرما باید تأمین شود؟
مشـــخص کنید چه مقدار پول در اختیار دارید	▪ چگونگی تأمین مالی خود را بررسی کنید ▪ پیش‌بینی می‌کنید وضعیت درآمدی شما در آینده چگونه توسعه می‌یابد؟ ▪ آیا در آینده نزدیک، وضعیت مالی شما دستخوش تغییرات اساسی خواهد شد؟
اهداف مرحله ۱	▪ ارزیابی اولیه امکانات از دیدگاه سازماندهی کسب و کار ▪ کسب تجربه از نیروگاه‌های بیوگاز در دنیای واقعی ▪ کسب دانش در مورد نیروگاه‌ها / تجهیزات موجود در بازار

۱۰-۳- مطالعات امکان‌سنجی

هنگامی که بر اســاس طرح کلی پروژه تصــمیم به انجام مرحله بعدی پروژه بیوگاز گرفته می‌شــود، ضــرورت دارد مطالعات امکان‌سنجی انجام شود. انجام مطالعات امکان‌سنجی بسیار متکی بر طرح کلی پروژه است و هدف اصلی آن، تعیین تمام داده‌ها و پارامترهای فنی و اقتصــادی و ارزیابی دقیق آنها اســت. برخلاف طرح کلی پروژه که در آن ارزیابی کیفی اولیه از پروژه برنامه‌ریزی‌شده ارائه می‌شود، هدف از انجام مطالعات امکان‌سنجی ارائه ارزیابی کمی از پروژه مورد نظر و همچنین، گزینه‌های احتمالی برای تحقق آن است.

معیارهای اصلی برای انجام مطالعات امکان‌سنجی در یک پروژه نیروگاه بیوگاز در شکل زیر نمایش داده شده است. مطالعات امکان‌سنجی یک سند تصمیم‌گیری است که به اهداف زیر می‌پردازد:

- بررسی امکان‌پذیری فنی و اقتصادی پروژه بر اساس تحقیق در مورد تمام پارامترها و الزامات ویژه ساختگاه؛
- ارزیابی ریسک‌های فنی و اقتصادی؛
- شناسایی معیارهای استثناء؛
- راستی‌آزمایی ساختارهای سازمانی و عملیاتی محتمل؛
- فراهم کردن زمینه برای تهیه درخواست اعطای یارانه دولتی؛
- فراهم کردن زمینه برای ارزیابی تمکن مالی.



شکل (۱۰-۳) معیارهای انجام مطالعات امکان‌سنجی یک پروژه نیروگاه بیوگاز [۳۱]

مرحله ۲: انجام مطالعات امکان‌سنجی

از خدمات یک شرکت مهندسی باسابقه و معتبر / گروه مهندسی یک شرکت سازنده باسابقه و معتبر نیروگاهی استفاده کنید

- این اشخاص برای برنامه‌ریزی و توسعه بیشتر پروژه بسیار حائز اهمیت هستند و در تمام مراحل بعدی مشارکت خواهند داشت.
- این اشخاص به افراد مرتبط در مراجع صدور مجوز و همچنین، مقامات محلی دسترسی دارند.

با یک مشاور کشاورزی در تماس باشید

- یک مشاور کشاورزی در ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های بیوگاز تبحر داشته و در ارتباط با سایر موضوعات، از انتخاب ساختگاه و طراحی نیروگاه گرفته تا احداث و راه‌اندازی آن، یک مشاور حرفه‌ای خواهد بود.

در مورد نوع نیروگاه و روال ساخت، همچنین اندازه نیروگاه تصمیم‌گیری کنید

- تعریف ویژگی‌های ساختگاه مانند گزارش خاک.
- انتخاب ساختگاه (با توجه به طرح کلی زمین کشاورزی، ساختمان‌ها و محوطه سیلوها).
- تعیین محل نزدیکترین نقطه دسترسی به شبکه برق یا تزریق گاز.
- تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب پیکربندی / طراحی و فناوری مناسب برای نیروگاه بیوگاز.
- تعیین ابعاد و اندازه اجزاء نیروگاه بر اساس تحلیل پتانسیل‌ها.

پرسش‌های متداول

- پروژه قرار است چگونه انجام شود؟
- آیا نیروگاه به صورت کلید در دست تحویل گرفته می‌شود؟

- آیا قرار است روند احداث نیروگاه در قالب چند قرارداد جداگانه انجام شود؟
- چه مقدار از کار قرار است توسط شما انجام شود؟
- آیا امکان انجام مشترک پروژه با ساکنین اطراف وجود دارد؟
- کدام بخش از کارهای قرارداد قرار است به مناقصه گذاشته شود؟ (به عنوان مثال، عملیات خاک‌برداری، برق نیروگاه و ...)

اهداف مرحله ۲

- مشارکت یک شرکت مهندسی باسابقه یا یک مشاور مجرب برای انجام مطالعات امکان‌سنجی
- تعیین اندازه مورد نظر نیروگاه و نوع نیروگاه به همراه نقاط احتمالی تغذیه با برق، حرارت یا بیوگاز تصفیه‌شده.

۱۰-٤- مساحت مورد نیاز جهت احداث نیروگاه بیوگاز

بر اساس ماده ۲ آیین‌نامه نصاب اراضی قابل واگذاری به فعالیت‌های مختلف در خارج از حریم شهرها و روستاها موضوع تصویب نامه شماره ۴۲۸۴۹/۷۹۲۵۹ ه مورخ ۱۳۹۰/۰۴/۱۵ هیئت محترم وزیران و اصلاحیه‌های بعدی آن، جدول مساحت اراضی توافق‌شده فی‌مابین نمایندگان سازمان امور اراضی کشور و سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق وزارت نیرو (ساتبا) به شرح جدول ذیل مورد تأیید قرار گرفته است. مصوبه مربوطه در پیوست الف ارائه شده است.

جدول)۱۰-۱(میزان مساحت مورد نیاز جهت احداث نیروگاه بیوگاز بر اساس ظرفیت

ردیف	نوع فعالیت	ظرفیت (کیلووات)	حداکثر زمین مورد نیاز (متر مربع)	توضیحات
۱	تولید برق زیست‌توده- بیوگاز بر اساس فناوری هضم بی‌هوازی (با استفاده از فضولات دامی یا زائدات کشاورزی و گیاهی یا پسماندهای آلی فسادپذیر موجود در زباله‌های شهری)	۵۰۰	۷۵۰۰	-
۲		۱۰۰۰	۱۵۰۰۰	برای ظرفیت‌های بیش از ۵۰۰ کیلووات الی ۱۰۰۰ کیلووات، به ازای هر ۱۰۰ کیلووات اضافه، ۱۵۰۰ متر مربع زمین اضافه می‌شود.
۳		۵۰۰۰	۴۵۰۰۰	برای ظرفیت‌های بیش از ۱۰۰۰ کیلووات الی ۵۰۰۰ کیلووات، به ازای هر ۱۰۰ کیلووات اضافه، ۷۵۰ متر مربع زمین اضافه می‌شود.

توضیح:

- زمین مورد نیاز برای ظرفیت‌های کمتر از ۵۰۰ کیلووات و بیش از ۵۰۰۰ کیلووات، پس از بررسی طرح و نقشه سایت پلان نیروگاه توسط ساتبا، میزان زمین مورد نیاز تعیین خواهد شد.

۱۰-۵- ظرفیت قابل نصب

با توجه به گستردگی و تنوع انواع فناوری هضم بی‌هوازی و انعطاف‌پذیری این فناوری‌ها متناسب با نوع خوراک ورودی، غلظت خوراک، دما و سایر پارامترها، محدودیت چندانی در ظرفیت قابل نصب وجود ندارد. در مقابل، عوامل و پارامترهای خارجی و محیطی همچون عوامل اقتصادی، محیط زیستی، زمین و توپوگرافی آن، نوع خوراک و مقدار آن و مدیریت کل نیروگاه و ... ظرفیت قابل نصب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. محاسبه مقیاس نیروگاه هضم بی‌هوازی با مشخص کردن پارامترهایی همچون میزان خوراک ورودی روزانه، زمان ماند و تولید روزانه گاز که متأثر از میزان تغذیه روزانه و زمان ماند می‌باشد، صورت می‌گیرد.

۱۰-۶- مدت زمان احداث

با توجه به پیچیدگی و مقیاس نیروگاه، مدت زمان احداث متغیر می‌باشد. برای نیروگاه‌ها در مقیاس متوسط تا بزرگ (۳۰۰ متر مکعب و بیشتر) به طور معمول، از اولین مرحله احداث تا مرحله بهره‌برداری، ۸ ماه تا ۲ سال طول می‌کشد.

۱۰-۷- توان قابل استحصال نیروگاه هضم بی‌هوازی

خوراک مناسب برای تولید برق در نیروگاه‌های بیوگاز معمولاً به میزان کافی در بسیاری از کشورها وجود دارد. نیروگاه‌های بیوگاز در مقیاس‌های مختلف می‌توانند سهم قابل توجهی در تولید برق در جوامع مختلف داشته باشند. با این وجود، در مقایسه با کشورهای صنعتی، تعداد بسیار اندکی نیروگاه بیوگاز در مقیاس کوچک و متوسط برای تولید برق در آفریقا، آمریکای لاتین و حتی آسیا مشاهده می‌شود.

تولید برق از بیوگاز می‌تواند یک روش بسیار کارآمد برای تولید برق از یک منبع تجدیدپذیر باشد. با این وجود، از دیدگاه انرژی تنها زمانی تولید برق از بیوگاز توجیه‌پذیر است که گرمای حاصل از تولید برق به لحاظ اقتصادی و محیط زیستی قابل استفاده باشد. ارزش حرارتی بیوگاز در حدود ۲۱ تا ۲۳/۵ مگاژول بر متر مکعب (MJ/m^3) است. این بدان معناست که هر یک متر مکعب بیوگاز معادل ۰/۵ تا ۰/۶ لیتر سوخت دیزل بوده یا محتوای انرژی آن در حدود ۶ کیلووات ساعت (kWh) می‌باشد. با این وجود، به دلیل هدررفت انرژی در زمان تبدیل، از هر متر مکعب بیوگاز تنها می‌توان در حدود ۱/۷ کیلووات ساعت برق (kWh_{el}) تولید کرد [۳۵].

میانگین تولید بیوگاز از فرایند هضم بی‌هوازی مواد آلی که بر حسب درصدی از ماده خشک بیان می‌شود، برای برآورد ظرفیت بیوگاز استفاده می‌شود. بازده بیوگاز را می‌توان با استفاده از فرمول زیر محاسبه کرد [۳۶]:

$$V_{biogas} = m_S \times DM_S \times ODM_S \times BY_S \qquad (۱۰-۱۲)$$

که در آن:

V_{biogas}	بازده بیوگاز	m^3/a
M_S	جرم خوراک مفروض	t/a
DM_S	ماده جامد خوراک مفروض	$\%$
ODM_S	ماده جامد آلی خوراک مفروض	$\%$
BY_S	ضریب تبدیل خوراک مفروض	$m^3{}_{biogas}/t_{ODM}$

از بیوگاز می‌توان برای تولید برق، حرارت یا هر دو با استفاده از مولدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) استفاده کرد. در آلمان، استفاده از بیوگاز در مولدهای CHP بیشترین کاربرد را دارد. برق تولیدشده از این روش به شبکه سراسری برق تزریق شده و گرمای حاصل از آن نیز در شبکه‌های گرمایش محلی توزیع می‌شود. بخشی از گرمای تولیدشده صرف فرایند هضم بی‌هوازی شده و ممکن است بخش دیگری از آن، صرف سترون کردن خوراک شود. معمولاً راندمان الکتریکی مولدهای CHP، حدود ۴۰٪ و راندمان حرارتی آن‌ها، حدود ۴۷٪ در نظر گرفته می‌شود [۳۶].

از اصل هم‌ارزی می‌توان برای تبدیل دو منبع انرژی استفاده کرد. در نتیجه، با فرض این که ارزش حرارتی کلی بیوگاز ۶/۰۶ کیلووات ساعت بر متر مکعب (kWh/m^3) باشد، از هر متر مکعب بیوگاز در حدود ۲/۷۶ کیلووات ساعت بر ساعت برق (kWh/h) و ۳/۳ کیلووات ساعت بر ساعت حرارت (kWh/h) تولید می‌شود [۳۶]. برای محاسبه برق و حرارت تولیدشده از بیوگاز حاصل از خوراک مفروض، از روابط زیر استفاده می‌شود [۳۶]:

$$E_{el} = \frac{m_S \times DM_S \times ODM_S \times BY_S \times 6.06 \times \eta_{el}}{t} \quad (۱۰-۱۳)$$

$$E_{th} = \frac{m_S \times DM_S \times ODM_S \times BY_S \times 6.06 \times \eta_{th}}{t} \quad (۱۰-۱۴)$$

که در آن:

E_{el}	میزان تولید برق از بیوگاز	kW
E_{th}	میزان تولید حرارت از بیوگاز	kW

۱۰-۸- عمر مفید نیروگاه

عمر مفید یا عمر اقتصادی یک سیستم، طرح یا تجهیزات عبارت است از دوره زمانی (تعداد سال‌هایی) که سیستم در حال کار بوده و انتظار می‌رود به صورت مطلوب و سوددهی مورد انتظار به کار خود ادامه دهد. به بیانی دیگر، طی عمر اقتصادی، سیستم حداقل هزینه تعمیرات و نگهداری را داشته و در مجموع هزینه‌های آن مورد قبول فرد تصمیم‌گیرنده است.

ارزش اسقاطی یک سیستم عبارت است از مقدار ارزش خالص باقیمانده آن سیستم در پایان عمر مفید یا اقتصادی سیستم. این مقدار برابر با جمع جبری ارزش باقیمانده سیستم و هزینه‌های جمع‌آوری و حمل و نقل ضایعات آن است، لذا می‌تواند مثبت، صفر یا منفی در محاسبات منظور گردد.
در یک نیروگاه هضم بی‌هوازی، تجهیزات متعددی خراب خواهند شد و همواره نیاز به تعمیر دارند. در نتیجه، تعمیرات و نگهداری به طور مرتب مورد نیاز است. واحد CHP در بازه کاری ۲۰۰۰ تا ۲۰,۰۰۰ ساعت نیاز به سرویس دارد و هر ۴۰,۰۰۰ ساعت کار نیاز به تعمیرات اساسی دارد. هر ۳ تا ۵ سال، پمپ‌ها نیاز به تعمیرات اساسی دارند. مابقی تجهیزات بعید است که با اتمام عمر کاری مکانیکی خود (۱۰ تا ۲۰ سال) تحت شرایط استاندارد، از رده خارج شوند، اگر چه ممکن است نیاز به تعمیرات خاصی داشته باشند. بر همین اساس، در مورد نیروگاه‌های بیوگاز عمدتاً عمر مفید بین ۲۰ تا ۳۰ سال در نظر گرفته می‌شود و جهت برآورد هزینه‌های اسقاطی بسته به شرایط سرمایه‌گذار باید هزینه‌ها و درآمدها در محاسبات ملاحظه گردد.

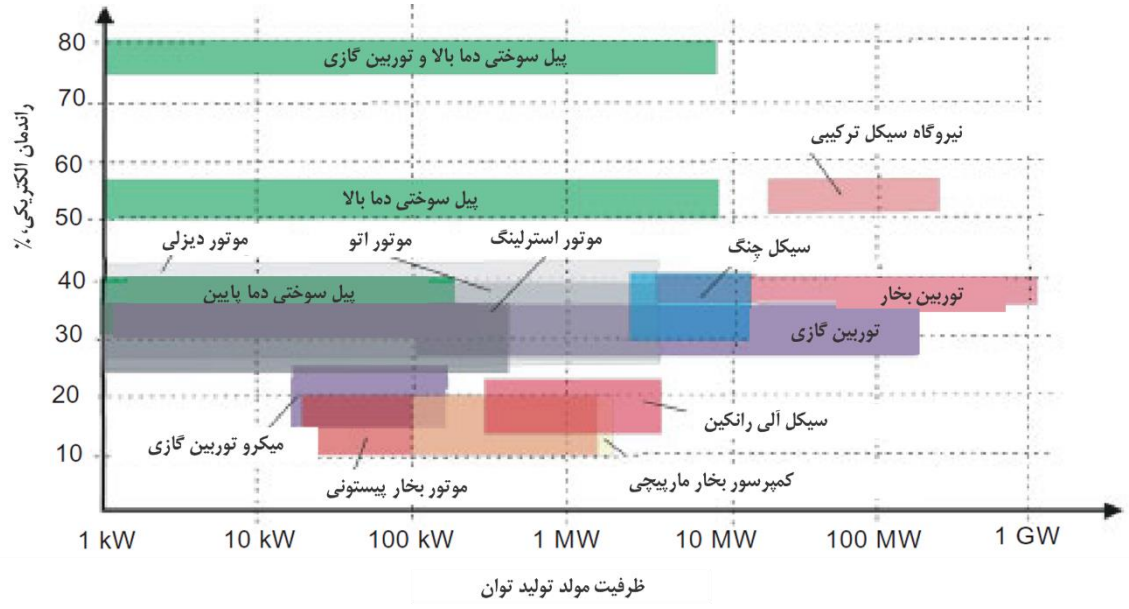
۱۰-۹- جریان مواد و انرژی در نیروگاه بیوگاز

موازنه جرم و انرژی برای تعیین ورود و خروج مواد و انرژی در سیستم‌های تولید انرژی کاربرد دارد. جریان مواد و انرژی، مسیر گردش مواد در سیستم و تراز جرم و انرژی را در کل سیستم نمایش می‌دهد. با وجود موازنه جرم و انرژی، از بروز خطا در محاسبات پیشگیری به‌عمل می‌آید. بدین صورت که ابتدا یک نمودار شماتیک از جریان مواد و انرژی سیستم هدف ساخته می‌شود. سپس داده‌های مربوط به جریان مواد و انرژی به دست می‌آید و سرانجام، ارزیابی‌های متعددی انجام می‌شود. شکل (۲-۶)، شماتیکی از موازنه جرم و انرژی در نیروگاه بیوگاز ساوه را نشان می‌دهد [۳۷].
با توجه به اهمیت تولید انرژی از نیروگاه‌های بیوگاز، الزاماتی که فرایند تولید بیوگاز را توصیف می‌کنند در حال افزایش است. در این ارتباط، تخمین پتانسیل تولید بیوگاز می‌تواند یکی از مهمترین معیارها برای ارزیابی یک نیروگاه بیوگاز باشد.
در این زمینه، رویه‌های مختلفی برای معرفی و ارزیابی فرایندهای مهندسی وجود دارد. به عنوان مثال، موازنه جرمی (موازنه مواد)، امکان ارزیابی نیروگاه بیوگاز بر اساس مقدار و ترکیب خوراک مصرفی، پارامترهای فرایندی مهندسی فرایند و فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها را فراهم می‌کند. علاوه بر پیش‌بینی نرخ تولید بیوگاز یا پتانسیل باقیمانده گاز، موازنه جرمی امکان کنترل بهینه فرایند را فراهم کرده و پایه و اساس تعیین اندازه واقعی نیروگاه یا محاسبه اقتصادی نیروگاه‌های بیوگاز را تشکیل می‌دهد.
موازنه جرم به صورت مستقیم، دقیق و جامع امکان‌پذیر و عملی است، اما در اغلب موارد قابل پیاده‌سازی نیست، زیرا در پاره‌ای از اوقات، اندازه‌گیری جریان مواد ورودی و خروجی، همچنین واکنش‌های سینتیکی علیرغم اقدامات مؤثر مقدور نمی‌باشد یا ممکن است مبانی فنی وجود نداشته باشد. با این وجود، امروزه روش‌های متنوعی برای تخمین حداکثر پتانسیل تولید بیوگاز یا بازده واقعی بیوگاز در نیروگاه‌های واقعی وجود دارد. بر مبنای ملاحظات پایه، روش‌ها، گزینه‌ها و عدم‌قطعیت‌های مختلف موازنه جرمی نیروگاه‌های بیوگاز در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شود.

۱۰-۱۰- کاربردهای بیوگاز

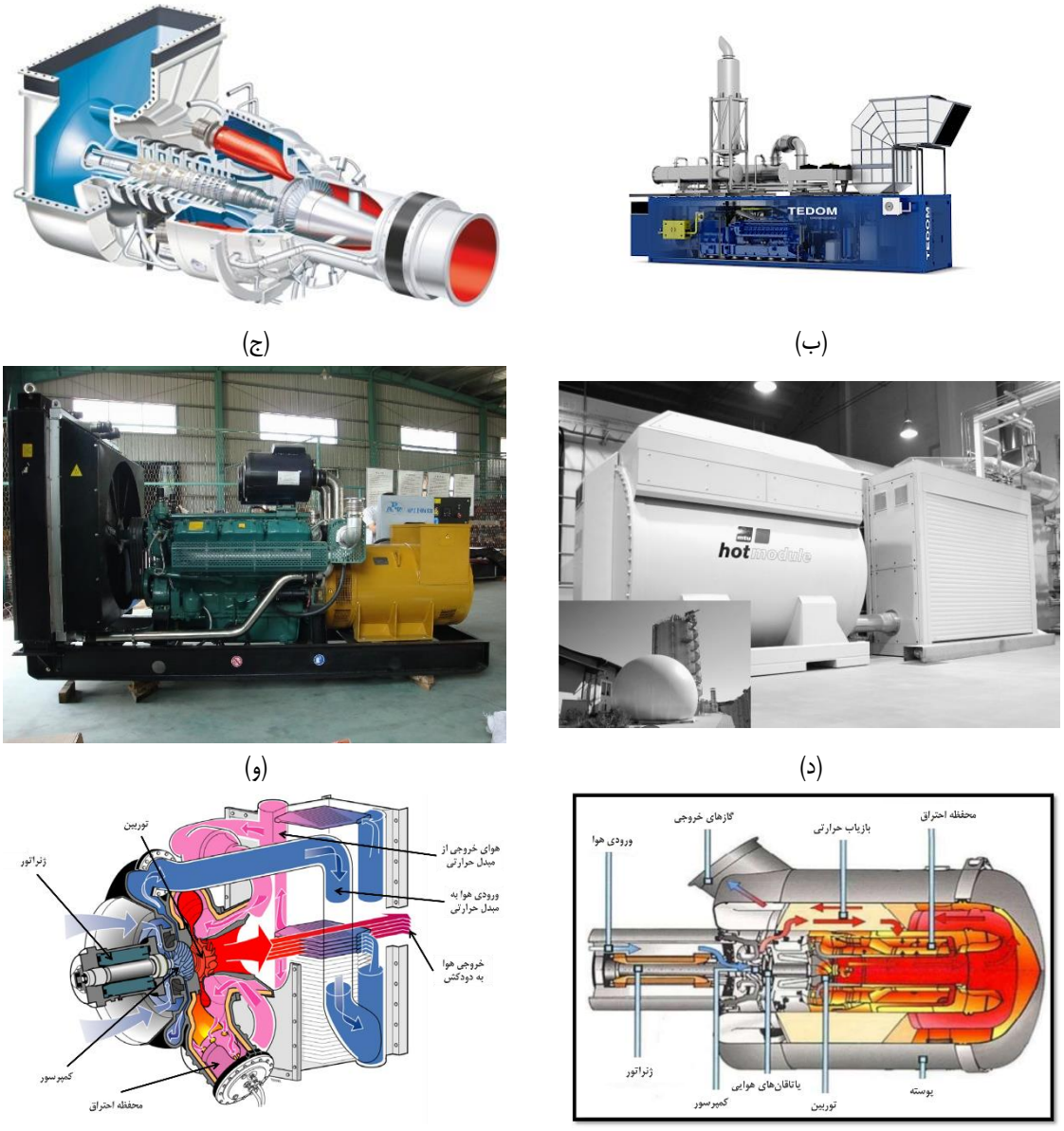
در نیروگاه‌های بیوگاز، به موازات تولید برق، حرارت نیز تولید می‌شـــود. به این نیروگاه‌ها که در آنها به طور هم‌زمان، برق و حرارت تولید می‌شـــود نیروگاه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت[1] (CHP) گفته می‌شـــود. معمولاً در این نیروگاه‌ها از موتورهای چهار زمانه یا موتورهای دیزلی استفاده می‌شود. در نیروگاه‌های CHP، از گزینه‌های دیگری هم می‌توان برای تولید هم‌زمان برق و حرارت استفاده کرد که شامل موتور استرلینگ، توربین گازی، میکروتوربین گازی، پیل‌های سوختی دما بالا و دما پایین یا ترکیبی از پیل سوختی دما بالا با توربین گازی، می‌شود. همچنین، می‌توان با سوزاندن بیوگاز و تبدیل آن به بخار، از آن در سیکل آلی رانکین[2] (ORC)، سیکل چِنگ[3]، توربین بخار، موتور بخار پیستونی یا موتور بخار مارپیچی استفاده کرد. از بیوگاز می‌توان در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی (بخاری-گازی) هم استفاده کرد.

در شکل (۲-۸)، محدوده ظرفیت مولدهای تولید توان در مقیاس پایلوت و مقیاس صنعتی نشان داده شده است [۵۲].



(الف)

[1] Combined Heat and Power (CHP)
[2] Organic Rankine Cycle (ORC)
[3] Cheng Cycle



(ب) (ج)

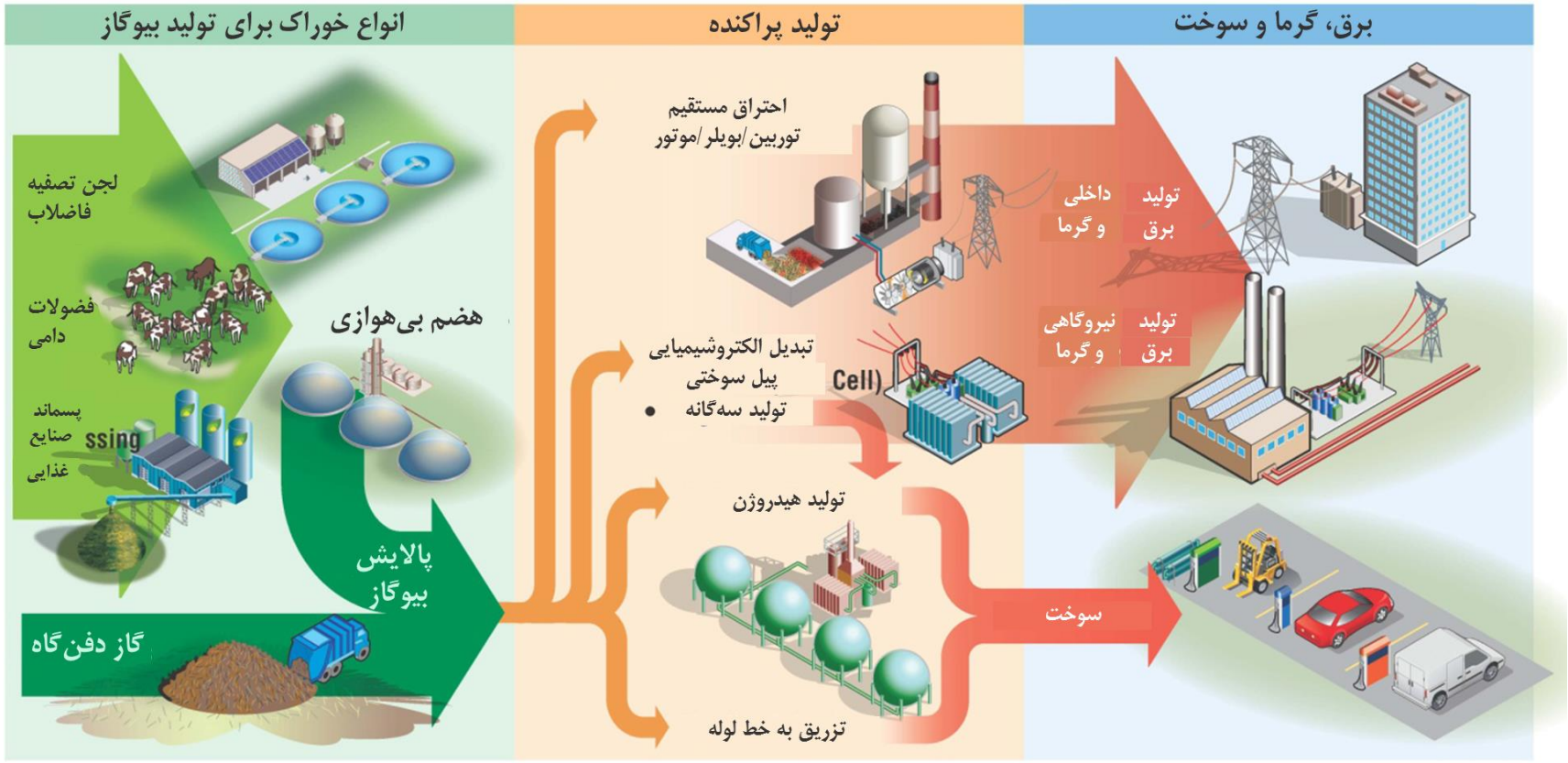
(د) (و)

(ه) (ی)

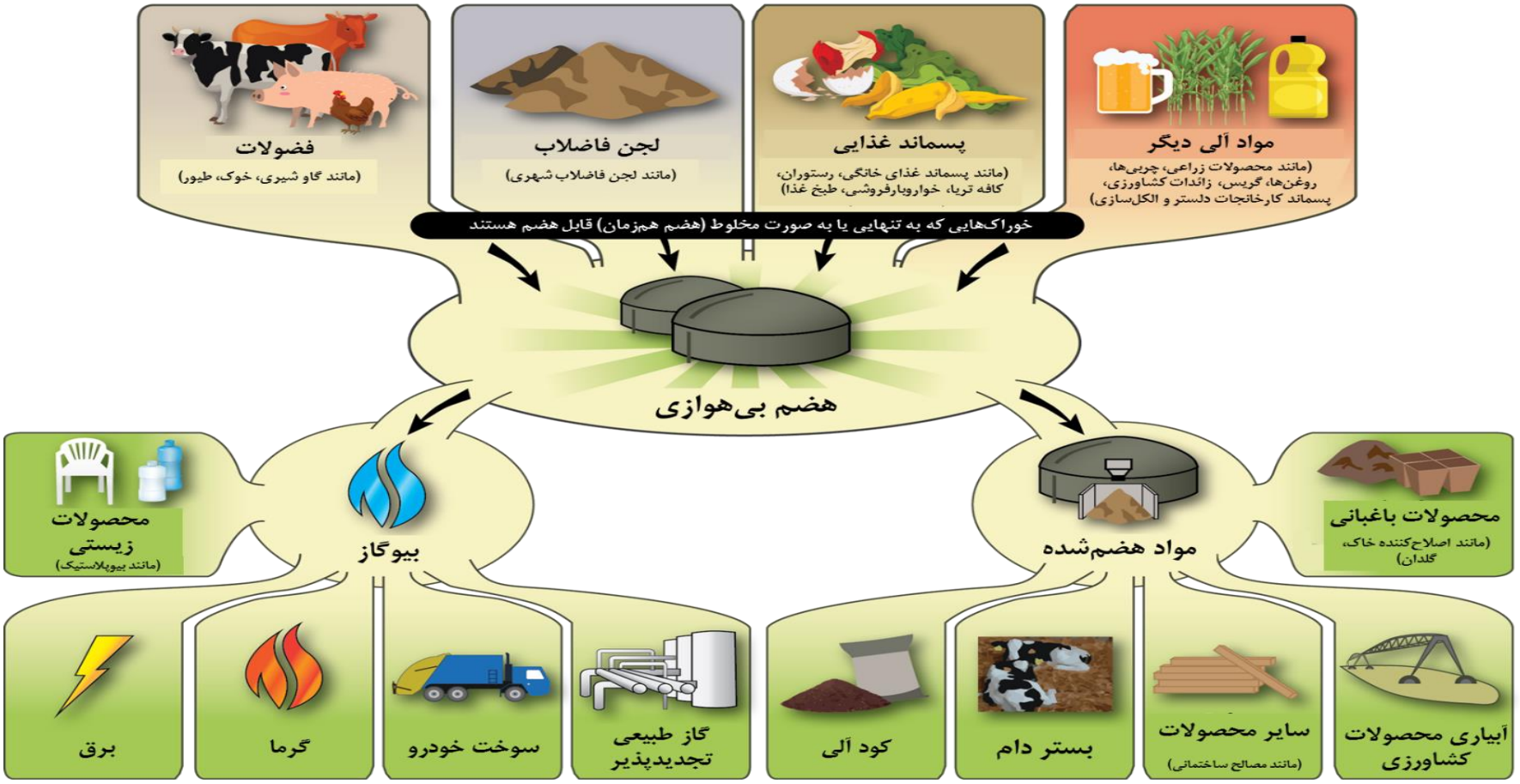
شکل (۱۰-۴) مولدهای تولید توان

(الف) تحقیق؛ (ب) CHP؛ (ج) توربین گازی؛ (د) پیل سوختی کربنات مذاب؛ (و) موتور دیزل؛ (ه) میکروتوربین گازی؛ (ی) میکروتوربین گازی

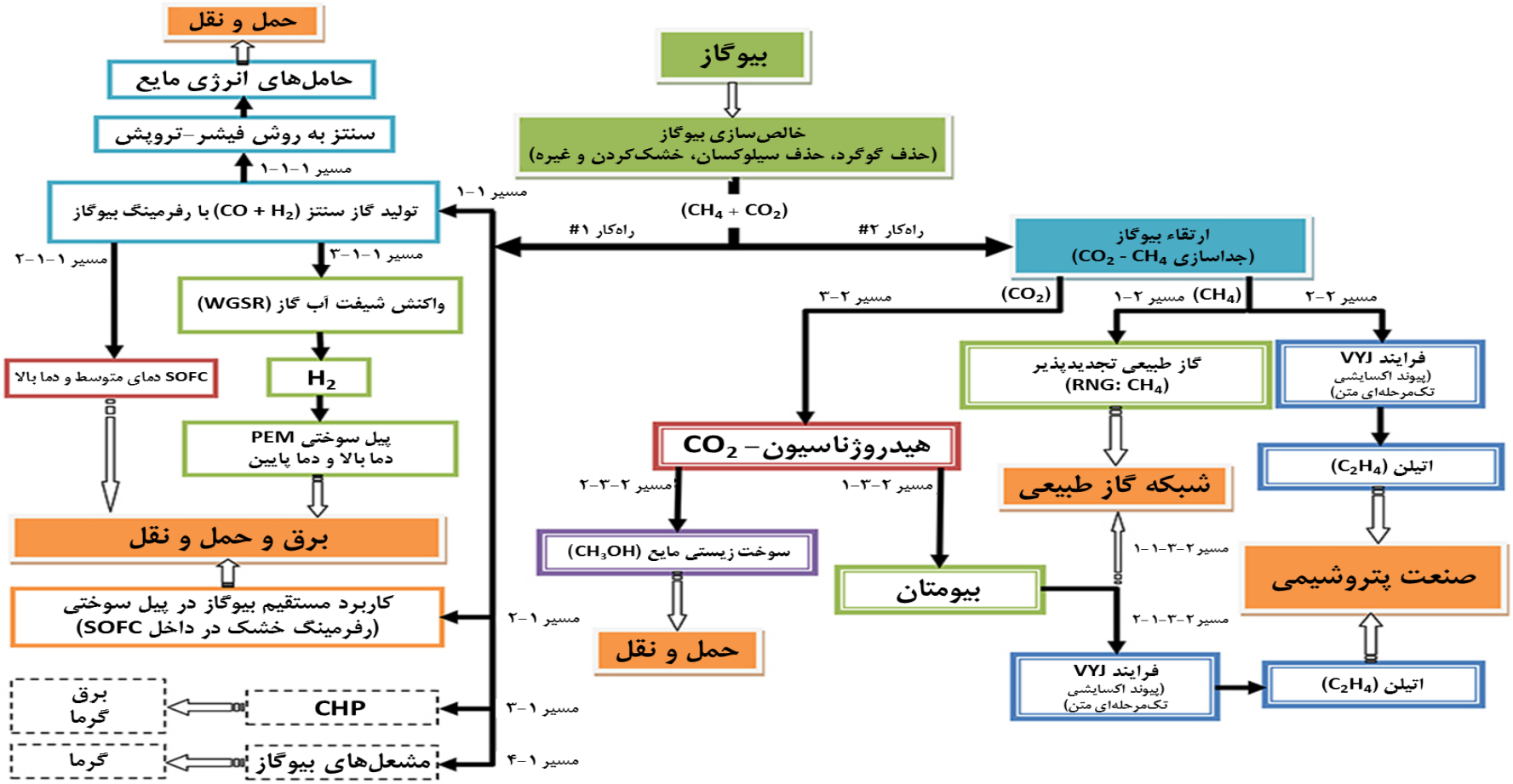
راندمان به صورت نسبت برق تولیدشده به محتوای انرژی کل در بیوگاز تعریف می‌شود. در شکل (۲-۹)، مسیرهای تبدیل زیست‌توده به برق، گرما و هیدروژن نشان داده شده است [۵۳]. در شکل (۲-۱۰)، تبدیل منابع زیست‌توده به بیوگاز و مواد هضم‌شده و محصولات نهایی نشان داده شده است [۵۴]. در شکل (۲-۱۱)، مسیرهای پیشرفته ممکن برای تولید انرژی یا مواد شیمیایی باارزش از بیوگاز نشان داده شده است [۵۵].



شکل (۱۰–۵) مسیرهای تبدیل زیست‌توده به برق، گرما و هیدروژن



شکل (۱۰-۶) تبدیل منابع زیست‌توده به بیوگاز و مواد هضم‌شده و محصولات نهایی



شکل (۱۰-۷) مسیرهای پیشرفته ممکن برای تولید انرژی یا مواد شیمیایی باارزش از بیوگاز

۱۰-۱۱- استانداردهای نیروگاه‌های زیست‌توده

تا انتهای آذر ۹۷ برای نیروگاه‌های زیست‌توده تعداد ۶۷ استاندارد از میان استانداردهای بین‌المللی توسط سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) تدوین شده است و سرمایه‌گذاران، توسعه‌دهندگان، سازندگان تجهیزات و سایر ذینفعان می‌توانند مهم‌ترین استانداردهای فناوری‌های زیست‌توده را که در قراردادهای خرید تضمینی برق تجدیدپذیر این سازمان نیز مدنظر است، در سایت این سازمان مشاهده نمایند [۷]. متن کامل استانداردهای دارای کد و نشان ملی از وب‌سایت سازمان ملی استاندارد قابل دریافت می‌باشد. استانداردها در پنج حوزه زیر تدوین‌شده‌اند:

۱- استانداردهای مرحله طراحی
۲- استانداردهای مرحله تأمین تجهیزات
۳- استانداردهای مرحله نصب و اجرا
۴- استانداردهای مرحله اتصال به شبکه
۵- استانداردهای مرحله بهره‌برداری

فهرست استانداردهای مربوط به حوزه زیست‌توده که در سال ۱۳۹۷ به تصویب سازمان ملی استاندارد رسیده است به انضمام کد و شماره استاندارد ملی به‌صورت موردی در پیوست (ب) ارائه شده است. صاحبان صنایع می‌توانند در هر مرحله از احداث نیروگاه‌های زیست‌توده به استاندارد مربوطه مراجعه و تصمیمات لازم در آن مرحله را اتخاذ نمایند.

مراجع

[114] International Energy Agency (IEA); “Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector” Report; May 2021
[115] IRENA Bioenergy Data, Available online: https://www.irena.org/bioenergy, (accessed on 22 August 2021).
[116] REN21, “Renewables 2020: Global Status Report” Report, 2020, p81
[117] Official Journal of the European Communities; “Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the Promotion of Electricity Produced from Renewable Energy Sources in the Internal Electricity Market”; 2001.
[118] Niroo Research Institute (NRI), Full Reports of “National Strategy Document and Roadmap for the Development of Biomass Energy-Related Technologies in Iran”, Available online: https://www.nri.ac.ir/Tech-Plan, (accessed on 10 August 2021).
[119] Morteza Aien and Omid Mahdavi, "On the Way of Policy Making to Reduce the Reliance of Fossil Fuels: Case Study of Iran", Journal of Sustainability, 18 December 2020.
[120] SATBA (Renewable Energy and Energy Efficiency Organization), 2021, Available online: http://www.satba.gov.ir (accessed on 10 August 2021).
[121] Paul Greene, Ebook of “Anaerobic Digestion & Biogas”, Natural Systems Utilities (NSU) Company, 2015.
[122] Energypedia, “Pumps for Biogas Plants”, Available online: https://energypedia.info/wiki/Pumps_for_Biogas_Plants, (accessed on 26 August 2021).
[123] WELTEC Stainless Steel Digester, Available online: https://www.weltec-biopower.it/info-center/galleria-fotografica.html, (accessed on 28 August 2021).
[124] STRABAG Dry Digester, Available online: https://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/EN-STRABAGUMWELTTECHNIK.COMN-anlagenbau_trockenvergaerung.html, (accessed on 28 August 2021).
[125] Vertical Linear Mixer, Available online: https://www.ovivowater.com/product/municipal/municipal-wastewater/sludge-treatment-anaerobic-digestion/digestion-mixing/ovivo-lm-mixer-linear-motion/, (accessed on 28 August 2021).
[126] Hydroflux Industrial Company, Fixed & Floating Roof Digester, Available online: https://www.hydrofluxindustrial.com.au/epco-australia/digesters/applications/primary/, (accessed on 28 August 2021).
[127] Raj Kurup FIEAust, “Techno-Economic Evaluation of EEI Self-Regulating Suspended Biogas Collectors (SSBC) for Abattoirs” Report, 2 August 2016.
[128] Walker Process Equipment Company, Digester Fixed Covers, Available online: http://www.walker-process.com/prod_digestion_fixed.htm, (accessed on 30 August 2021).

[129] Green Mile Team, “Parts of Biogas Power Plant”, Available online: http://greenmileteam.com/en/parts-of-biogas-power-plant/, (accessed on 02 September 2021).

[130] EPA, “An Overview of Renewable Natural Gas from Biogas” Report, July 2020.

[131] IEA, "Outlook for biogas and Biomethane, Prospects for Organic Growth", World Energy Outlook Special Report, 2020.

[132] Clarke Energy Company, “Biogas Engines”, Available online: https://www.clarke-energy.com/applications/biogas/, (accessed on 06 September 2021).

[133] Energypedia, “Digester Heating”, Available online: https://energypedia.info/wiki/Digester_Heating#cite_ref-Krieg_.28TBW.29_0-0, (accessed on 09 September 2021).

[134] F. Makamure, P. Mukumba, G. Makaka, “An analysis of bio-digester substrate heating methods: A review”, Jornal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 137, March 2021, 110432

[135] Teleszewski et al., “Analysis of heat loss of a biogas anaerobic digester in weather conditions in Poland”, Journal of Ecological Eng 2018, 19(4): 242–50.

[136] Rynkowski P, “Heat loss analysis in the semi-buried anaerobic digester in Northeast Poland”, E3S Web of Conferences 2018, 44:00156.

[137] Steinman et al., “Developing Automated Energy Efficient Solar hheating for Biogas Digesters”, Project Final Report, Presented at AASHE National Conference; October 2016. Baltimore.

[138] MinEnery Pvt. Ltd Lalitpur, Nepal, “Opimization of Biogas Plants using Digester Heating Technologies”, Final Report of Alternative Energy Promotion Centre Khumatar Lalitpur, Nepal, 2014.

[139] Guo et al., “Biogas production and heat transfer Performance of a multiphase flow digester”, Energies 2019, 12(10):1960.

[140] Walker Process Equipment, “Anaerobic Digester Heating: External Sludge Heating Systems”, Available online: http://www.walker-process.com/pdf/2012_Anaerobic_Digester_Heating.pdf, (accessed on 09 September 2021).

[141] Pranav et al., “A basic Review on CFD Analysis of a tube in tube hellically coiled heat exchanger”, International Journal of Scientific Research and Reviews, 2018; 7(3).

[142] AAT Biogas Technology Company, “A Dairy Biogas Plant” Proposal, Ordered by ZETA Company as Official Representative of AAT in Iran, 2019.

[143] STRABAG Umwelttechnik GmbH Company, “A MSW Biogas Plant” Proposal, Ordered by Mehr-Azar Machine Company as Official Representative of STRABAG in Iran, 2020.

[144] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), “Guide to Biogas: From production to use”, 2012.

[145] Görisch, U.; Helm, M., “Biogasanlagen”; Ulmer Verlag, 2006.

[146] Müller-Langer, F., “Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen Energiesystem”, FNR, 2009

[147] SATBA (Renewable Energy and Energy Efficiency Organization), 2021, Available online: http://www.satba.gov.ir/fa/guidance/guidance/guidance1-%D8%AA%D8%B9%D8%B1%D9%81%D9%87-%D9%87%D8%A7%DB%8C-%D8%AE%D8%B1%DB%8C%D8%AF-%D8%AA%D8%B6%D9%85%DB%8C%D9%86%DB%8C-%D8%A8%D8%B1%D9%82-%D8%A7%D8%B2-%D8%AA%D8%AC%D8%AF%DB%8C%D8%AF%D9%BE%D8%B0%DB%8C%D8%B1%D9%87%D8%A7 (accessed on 27 November 2021).

[148] Energypedia, "Electricity Generation from Biogas", Available online: https://energypedia.info/wiki/Electricity_Generation_from_Biogas, (accessed on 15 December 2021).

[149] Abdullah Akbulut, O˘guz Arslan, Halit Arat, O˘guzhan Erbas, "Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study", Jornal of Case Studies in Thermal Engineering, Volume 26, August 2021, 101076.

[150] SATBA (Renewable Energy and Energy Efficiency Organization), Feasibility study and conceptual design of Saveh biogas power plant, Available online: http://www.satba.gov.ir/fa/project2/28/%D9%85%D8%B7%D8%A7%D9%84%D8%B9%D9%87-%D8%A7%D9%85%DA%A9%D8%A7%D9%86-%D8%B3%D9%86%D8%AC%DB%8C-%D9%88-%D8%B7%D8%B1%D8%A7%D8%AD%DB%8C-%D9%85%D9%81%D9%87%D9%88%D9%85%DB%8C-%D9%86%DB%8C%D8%B1%D9%88%DA%AF%D8%A7%D9%87-%D8%A8%DB%8C%D9%88%DA%AF%D8%A7%D8%B2-%D8%B3%D8%A7%D9%88%D9%87, (accessed on 16 December 2021).

[151] Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, (DBFZ : German Biomass Research Center), "Collection of Methods for Biogas", Series of the funding programme, "Biomass energy use", Volume 7, 2016.

[152] Weissbach F, "Zur Bewertung des Gasbildungs Potenzials von nachwachsenden Rohstoffen". Landtechnik, Vol. 63, No. 6, S. 356–358, 2008.

[153] Weissbach F, "Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung", Teil I: Das Gasbildungspotential der fermentierbaren Nährstoffe, [Determination of renewable feedstocks for biogas generation, Part 1] In: Pflanzenbauwissenschaften, Vol. 13, No. 2, pp. 72–85, ISSN 1431-8857, 2009.

[154] Weissbach F, "The future of forage conservation", In: Proceedings II International Symposium on Forage Quality and Conservation. Sao Pedro, Brazil, pp. 319–363, 2011.

[155] Weissbach F & Kuhla S, "Stoff Verluste bei der Bestimmung des Trockenmasse Gehaltes von Silagen und Grünfutter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur", [Material losses in the determination of the dry matter content of silage and soilage] In: Übersichten Tierernährung, Vol. 23, pp. 189–214, 1995.

[156] Weissbach F & Strubelt C, "Die Korrektur des Trockensubstanzgehalt von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen" [The correction of the total solids content of maize silages as substrate for biogas plants], In: Landtechnik, Vol. 63, No. 2, pp. 82–83, 2008a.

[157] Weissbach F & Strubelt C, "Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Grassilagen als Substrat für Biogasanlagen" [The correction of the total solids

content of grass silages as substrate for biogas plants]. In: Landtechnik, Vol. 63, No. 4, pp. 210–211, 2008b.

[158] Weissbach F & Strubelt C, “Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen” [The correction of the total solids content of sugar-beet silages as substrate for biogas plants]. In: Landtechnik, Vol. 63, No. 6, pp. 354–355, 2008c.

[159] Buswell AM & Mueller HF, “Mechanism of Methane Fermentation”, In: Industrial & Engineering Chemistry, Vol. 44, No. 3, pp. 550–552, DOI: 10.1021/ie50507a033, 1952.

[160] Boyle WC, “Energy Recovery from Sanitary Landfills-a review”, In: Microbial Energy Conversion. Schlegel HG & Barnea J (Eds.), Oxford: Pergamon Press, 1976.

[161] Mccarty PL, “Energetics of organic matter degradation”, In: Water Pollution Microbiology, Mitchell R (Ed.), pp. 91–118, New York: Wiley & Sons, 1972.

[162] Pavlostathis SG & Giraldo-Gomez E, “Kinetics of anaerobic treatment: A critical review”, In: Critical Reviews in Environmental Control, Vol. 21, No. 5–6, pp. 411–490, 1991.

[163] Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring BK, “A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas”, In: Biotechnology and Bioengineering, Vol. 63, No. 3, pp. 363–372, 1999.

[164] Batstone DJ, Keller J, Angelidaki I, Kalyuzhny S, Pavlostathis SG, Rozzi A, Sanders W, Siegrist H, Vavlin V, “The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)”, In: Water Science & Technology, Vol. 45, No. 10, pp. 65–73, 2002.

[165] Deublein D, Steinhauser A, “Biogas from Waste and Renewable Resources”, Second, Revised and Expanded Edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, ISBN: 978-3-527-32798-0, 2011.

[166] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Biogas and Fuel Cells Workshop Summary Report”, Proceedings from the Biogas and Fuel Cells Workshop Golden, Colorado, June 11–13, 2012.

[167] United States Environmental Protection Agency (EPA), “How Does Anaerobic Digestion Work?”, Available online: https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work, (accessed on 02 January 2022).

[168] Yentekakis IV and Goula G, “Biogas Management: Advanced Utilization for Production of Renewable Energy and Added-value Chemicals”, Frontiers in Environmental Science, Volume 5, February 2017.

[169] IEA Bioenergy, “The Biogas Handbook: Science, production and applications”, Edited by Arthur Wellinger, Jerry Murphy and David Baxter, Woodhead Publishing Limited, 2013.

[170] Chambers A K, Potter I, “Gas utilization from sewage waste”, Alberta Research Council, Edmonton. Available online: http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd08/gas.pdf (Accessed 20 September 2011), 2002.

[171] Rasi S, Veijanen A, Rintala J, "Trace compounds of biogas from different biogas production plants", Energy, 32, 1375–1380, 2007.

[172] Petersson A, Wellinger A, "Biogas upgrading technologies–developments and innovations", IEA Bioenergy Task 37, Available online: http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf (Accessed 12 May 2011), 2009.

[173] Persson M, Jonsson O, Wellinger A, "Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection", IEA Bioenergy, Task 24, Available from: http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/upgrading_report_final.pdf (Accessed 13 August 2011), 2006.

[174] Lastella G, Testa C, Cornacchia G, Notornicola M, Voltasio F, Sharma V K, "Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: Biogas production and its purification", Energy Convers Manage, 43, 63–75, 2002.

[175] Cox H H J, Deshusses A M, "Co-treatment of H2S and toluene in a biotrickling filter", Chem Eng J, 3901, 1–10, 2001.

[176] Tchobanoglous G, Burton F L, Stensel H D, "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse", 4th edition, McGraw-Hill, New York, 14, PP.1505–1532, 2003.

[177] Holm-Nielsen J B, Al Seadi T, "Manure-based biogas systems–Danish experience", in Lens P, Hamelers B, Hoitink H and Bidlingmaier W (eds), Resource Recovery and Reuse in Organic Solid Waste Management, IWA Publishing, London, pp. 377–394, 2004.

[178] Deublein D, Steinhauser A, "Biogas from waste and renewable resources: An Introduction", WILEY-VCH, Weinheim, pp. 361–388, 2008.

[179] Vandeweyer H, Baert R, Ryckebosch E, Leenknegt J, Drouillon M, Vervaeren H, "Biomethaan–opwerking van biogas tot aardgaskwaliteit", Hogeschool West-Vlaanderen, Howest, Departement PIH, 2008.

[180] Allen M R, Braithwaite A, Hills C C, "Trace organic compounds in landfill gas at seven U.K. waste disposal sites", Environ Sci Technol, 31, 1054–1061, 1997.

[181] Jaffrin A, Bentounes N, Joan A M, Makhlouf S, "Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth", Biosystems Eng, 86, 113–123, 2003.

[182] Dewil R, Appels L, Baeyens J, "Energy use of biogas hampered by the presence of siloxanes", Energy Convers Manage, 47, 1711–1722, 2006.

[183] Tower P, "New technology for removal of siloxanes in digester gas results in lower maintenance costs and air quality benefits in power generation equipment", in WEFTEC 03, 78th Annual Technical Exhibition and Conference, October 2003, Los Angeles, Available online: www.appliedfiltertechnology.com/page4813.asp (Accessed 23 May 2011), 2003.

[184] Prabucki M J, Doczyck W, Asmus D, "Removal of organic silicon compounds from landfill and sewer gas", in Proceedings Sardinia 2001, 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy. Cisa, Cagliari, vol. 2, pp.631–639, 2001.

[185] Environment Agency, “Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines”, Environment Agency, Bristol, UK. Available online: http://www.sepa.org.uk/waste/waste_regulation/landfill.aspx (Accessed 24 May 2011), 2004.

[186] Accettola F, Guebitz G M, Schoeftner R, “Siloxane removal from biogas by biofiltration: biodegradation studies”, Clean Technol Environ Policy, 10, 211–218, 2008.

[187] de Hullu J, Maassen J, vanMeel P, Siamak S, Vaessen J, Bini L, Reijenga J, “Biogas upgrading: Comparing different techniques”, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Available online: http://students.chem.tue.nl/ifp24/Final%20prese-nation.ppss (Accessed 10 May 2011), 2008.

[188] Rasi S, “Biogas composition and upgrading to biomethane”, Ph.D. Thesis, University of Jyva¨ skyla¨ , Finland, 2009.

[189] Krich K, Augenstein D, Batmale J P, Benemann J, Rutledge B, Salour D, “Biomethane from dairy waste: A sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California”, Available online: http://www.biogas.psu.edu/pdfs/BiomethanefromDairysourcebook.pdf (Accessed 12 August 2011), 2005.

[190] US EPA CHPP, “Technology characterization: Reciprocating engines, combined heat and power partnership program”, United States Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership Program, Washington, DC, Available online: http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_reciprocating_engines.pdf (Accessed 15 September 2011), 2008.

[191] Kallio M, “Biogas & Biomethane, Status report of Finland”, VTT Report of Agriforenergy2, Jyva¨ skyla¨ , IEE/08/600/SI2.528577, 2010.

[192] Scollo L, Valdez P, Baron J, “Design and construction of a Stirling engine prototype”, Int J Hydrogen Energ, 33, 3506–3510, 2008.

[193] US DOE, “A comparison of fuel cell technologies”, United States Department of Energy, Washington, DC, Available online: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pubs_educational.html (Accessed 27 August 2011), 2011.

[194] Möbius C.H, Helble A, “Stand der Technik in Konzeption und Sanierung von Abwasserbehandlungsanlagen f ü r Zellstoff - und Papierfabriken in Mitteleuropa”, Presented at the 28th Internationale Jahresfachtagung, Bled (SI), 2001.

[195] Technisches Inspektorat des Schweizerischen Gasfaches, Merkblatt TISG023/d: Aufbereitung und Lagerung von Biogasen, Available online: http://www.svgw.ch/deutsch/fi lesPR/MB_TISG_013.pdf (Accessed 10/07/20), 2004.

[196] Malenshek M, Olsen D.B, “Methane number testing of alternative gaseous fuels”, Journal of Fuel, Volume 88, Issue 4, Pages 650-656, April 2009.

[197] Recknagel J, “Kraftstoff aus Biomasse – Perspektiven für Landwirtschaft, Natur - und Landschaftsschutz?”, Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung Mülheim, (IfuL), Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim (LAP) Stuttgart, 2005.

[198] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, “Stand und Entwicklung der Biokraftstoffe Biodiesel, Rapsöl, Bioethanol und BTL in Deutschland und Thüringen”, Available online: http://www.tll.de/ainfo/pdf/biok0106.pdf (accessed 2010/07/09), 2005.

۱۱- فصل یازدهم : مقدمه

۱۱-۱- مقدمه

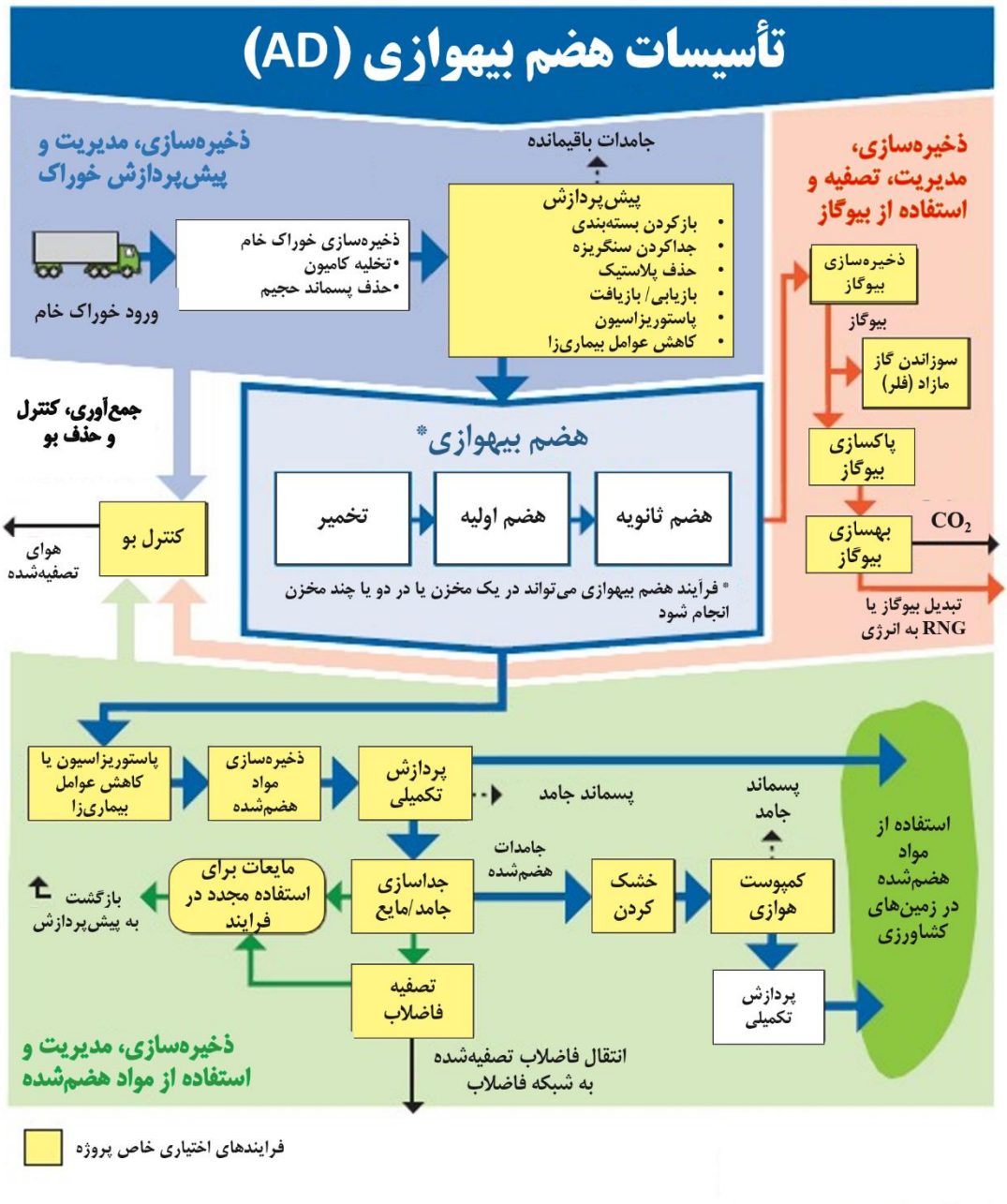
هضم بیهوازی یک فناوری اثبات‌شده و کاملاً شناخته‌شده در دنیا می‌باشد. هضم بیهوازی ابزاری مؤثر برای پردازش پسماند مواد غذایی و مواد آلی است که علاوه بر کاهش معنادار انتشار گازهای گلخانه‌ای، منجر به تولید سوخت کم کربن و بازگشت مواد مغذی به زمین از طریق تولید مواد هضم‌شده تقویت‌کننده خاک می‌گردد. کاهش گازهای گلخانه‌ای از طریق جذب و استفاده از بیوگاز برای تولید انرژی مفید مانند ۱) گاز طبیعی تجدیدپذیر[1] (RNG)، ۲) گرما و ۳) برق حاصل می‌شود. در جدول (۱-۱) نمای کلی از راهکارهای انطباق هضم بیهوازی با اهداف محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی دولت‌ها ارائه شده است.

جدول)۱۱-۱(منافع هضم بیهوازی

منافع اقتصادی- اجتماعی	منافع کشاورزی	منافع انرژی تجدیدپذیر	منافع محیط زیستی
▪ سرمایه‌گذاری ▪ ایجاد اشتغال ▪ توسعه اقتصادی منطقه‌ای	▪ توسعه اقتصادی روستایی ▪ افزایش سلامت و بهره‌وری خاک ▪ افزایش تنوع زیستی ارگانیسم‌های خاک ▪ تنوع بخشی به اقتصاد کشاورزی	▪ تأمین پایدار بار پایه ▪ امنیت انرژی و تنوع عرضه ▪ امکان استفاده انرژی در محل ▪ کمک به تحقق اهداف انرژی تجدیدپذیر	▪ مدیریت پایدار پسماند و منابع ▪ بهبود کیفیت هوا و آب ▪ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ▪ کاهش بو در مقایسه با فضولات فرآوری نشده ▪ کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کودهای مصنوعی ▪ کاهش عوامل بیماری زا

هضم بیهوازی یک فرایند بیولوژیکی است که در آن مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها در یک محیط کنترل‌شده و بدون اکسیژن تجزیه می‌شوند. هضم بیهوازی منجر به تبدیل مواد آلی به ۱) بیوگاز، یک منبع تجدیدپذیر سرشار از گاز متان و ۲) مواد هضم‌شده، یک ماده سرشار از مواد مغذی که شامل مواد مغذی باارزش برای گیاهان مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم می‌شود.
در شکل (۱-۱) طرح‌واره فرایند هضم بیهوازی با جزئیات بیشتر نمایش داده شده است.

[1] Renewable Natural Gas (RNG)

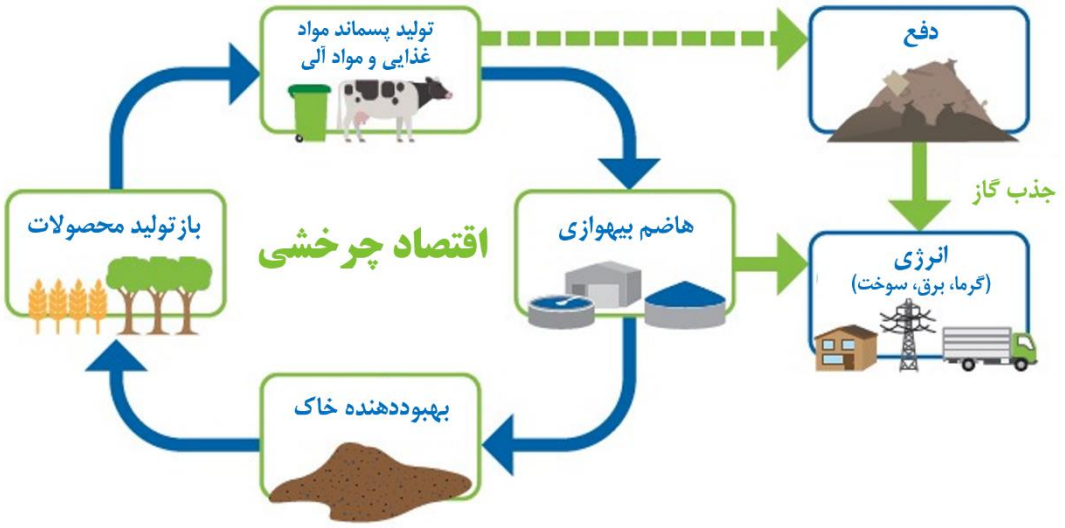


شکل (۱۱-۱) طرحواره فرایند هضم بیهوازی

بیوگاز یک منبع تجدیدپذیر متان است و متان ترکیب اصلی گاز طبیعی است. از بیوگاز برای گرمایش و سرمایش و یا برای تولید برق استفاده می‌شود. این محصولات را یا می‌توان در محل تولید مصرف کرد و یا به شبکه توزیع تزریق نمود. علاوه بر این، بیوگاز را می‌توان پس از پالایش، به گاز طبیعی تجدیدپذیر تبدیل کرد. در آنصورت بیومتان را می‌توان یا به خطوط لوله توزیع یا خطوط لوله انتقال گاز طبیعی تزریق نمود و یا پس از متراکم‌سازی به عنوان سوخت خودرو مورد استفاده قرار داد. به کل سیستم که شامل تجهیزات تولید انرژی می‌شود عموماً تأسیسات بیوگاز گفته می‌شود.

همانطور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، صنعت بیوگاز از طریق هضم بیهوازی پسماند آلی، جلوگیری از دفع آنها در مراکز دفن و تبدیل آنها به انرژی کم کربن و مواد تقویت‌کننده خاک، یک چرخه بسته ایجاد می‌کند تا اقتصاد چرخشی شکل بگیرد.

۱۱-۲- هدف کلان



شکل (۱۱-۲) هضم بیهوازی؛ بخش کلیدی در اقتصاد چرخشی

هدف از تهیه این دستورالعمل، کمک به ذینفعان در استقرار تأسیسات هضم به شیوه‌ای است که دستاوردهای بهتری حاصل شود و پایداری محیطی زیستی را تضمین کند. این دستورالعمل شامل توصیه‌هایی در خصوص برنامه‌ریزی، مکانیابی، طراحی، بهره‌برداری و شیوه‌های مدیریت ریسک برای تأسیساتی است که پسماند مواد غذایی و آلی را پردازش می‌کنند.

۱۱-۳- اهداف خرد

اهداف تهیه این دستورالعمل عبارتند از:

- طرح روشنی از بهترین رویه‌ها[1] برای پروژه‌های بیوگاز ارائه کند؛

[1] Best Practice

- با تنظیم‌گری (وضع مقررات) و رفع موانع از توسعه‌دهندگان و ذینفعان برای رشد در اقتصاد سبز حمایت نماید؛
- متقاضیان را آگاه سازد چگونه اثرات نامطلوب بهره‌برداری از تأسیسات هضم بیهوازی پسماندهای غذایی و آلی بر انسان‌ها، اشیاء، گیاهان و جانوران را به حداقل رسانده یا حذف کنند.
- سند مرجعی برای طراحی، اعتبارسنجی و بهره‌برداری ایمن و مؤثر از تأسیسات هضم بیهوازی در اختیار همگان قرار دهد.

۱۱-٤- محدوده کاربرد

این دستورالعمل برای هر نوع تأسیسات هضم بیهوازی- شامل تأسیسات جدید و در حال بهره‌برداری [در مقیاس] شهری، تجاری و کشاورزی- که پسماندهای غذایی و آلی را به روش هضم بیهوازی مدیریت می‌کنند در محدوده ایران اجرا می‌گردد. سیستم‌های گاز محل دفن پسماند (دفنگاه) و فرآیندهای تصفیه بیهوازی فاضلاب به طور خاص در شمول این دستورالعمل قرار نمی‌گیرند.
محدوده کاربرد این دستورالعمل صرفاً شامل خود تأسیسات هضم بیهوازی می‌گردد و بهترین رویه‌ها برای ارتقاء و بکارگیری خروجی‌های پایین دستی- بیوگاز و مواد هضم‌شده- را در بر نمی‌گیرد.
این دستورالعمل برای بکارگیری توسط توسعه‌دهندگان، بهره‌برداران، نهادهای دولتی و هر سازمان یا فرد که به توسعه، استقرار یا بهره‌برداری از تأسیسات هضم بیهوازی علاقمند بوده یا نقشی در آن دارد، تدوین شده است.

۱۲- فصل دوازدهم : قوانین، مصوبات و استانداردها

۱۲-۱- مقدمه

در دنیای امروز، بازیابی منابع و مدیریت پسماند مهمترین زمینه‌های تمرکز دولت‌ها است که هدف اصلی آن در درجه اول، حفظ سلامت عمومی، حفظ محیط زیست و صیانت از منابع طبیعی است. پسماندهای غذایی و آلی بخش عمده جریان مدیریت پسماند در هر کشور را تشکیل می‌دهد که در ایران تقریباً ۷۰ درصد از نظر وزنی را به خود اختصاص می‌دهد. نظارت بر مدیریت این نوع از پسماندها برعهده نهادهای مختلف دولتی در سطوح استانی، شهری و ناحیه‌ای است.

۱۲-۲- قوانین، مصوبات و استانداردها

در دنیای امروز، بازیابی منابع و مدیریت پسماند مهمترین زمینه‌های تمرکز دولت‌ها است که هدف اصلی آن در درجه اول، حفظ سلامت عمومی، حفظ محیط زیست و صیانت از منابع طبیعی است. پسماندهای غذایی و آلی بخش عمده جریان مدیریت پسماند در هر کشور را تشکیل می‌دهد که در ایران تقریباً ۷۰ درصد از نظر وزنی را به خود اختصاص می‌دهد. نظارت بر مدیریت این نوع از پسماندها برعهده نهادهای مختلف دولتی در سطوح استانی، شهری و ناحیه‌ای است.

در ایران قانونی برای مدیریت مواد هضم‌شده وجود ندارد. در حالی که به عنوان مثال در کشور کانادا، قانون ملی کود و برنامه ثبت کود توسط آژانس بازرسی مواد غذایی کانادا (CFIA)[1] که ذیل وزارت کشاورزی و غذا قرار دارد اجرا می‌شود. مواد هضم‌شده بعضاً تحت قانون کود مدیریت می‌شوند. تولیدکنندگان مواد هضم‌شده می‌توانند محصول خود را به عنوان کود تحت الزامات این قانون به بازار عرضه کنند. با این حال در تمامی مواردی که مجوزهای زیست‌محیطی برای تأسیسات هضم بیهوازی توسط اداره محیط زیست استان صادر می‌گردد این اقدام می‌بایست انجام شود. در کانادا، عموماً هر استان و هر منطقه خود موظف به تعیین بیشتر قوانین و مسئولیت‌های مربوط به بازیابی منابع و مدیریت پسماند است. اقدامی که در ایران از طریق تدوین طرح جامع مدیریت پسماند در سطح استان صورت می‌گیرد. کارگروه استانی مسئول نظارت بر حسن اجرای دستورالعمل تهیه طرح جامع مدیریت پسماند بوده و نظارت عالیه بر عهده وزارت کشور (سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور) می‌باشد.

در خصوص تأسیسات هضم بیهوازی به طور کلی قوانین در مورد مکانیابی، توسعه و بهره‌برداری این تأسیسات اعمال می‌شوند. این مقررات در موارد زیر اعمال می‌گردند:

- جمع‌آوری و حمل پسماند؛
- محدودیت‌های حاکم در نوع و مقدار خوراک[2] (پسماند پردازش‌نشده/مواد اولیه) و یا نسبت‌هایی از خوراک که برای پردازش دریافت می‌شود. به عنوان مثال، مقدار یا نسبت فضولات دامی به پسماند غیردامی، یا نسبت پسماند کشاورزی به پسماند غیرکشاورزی.

[1] Canadian Food Inspection Agency
[2] Feedstock

- الزامات بهداشت و ایمنی؛
- مدیریت مواد هضم‌شده و مواد مغذی جهت ضابطه‌مند کردن انبارش و استفاده از مواد مغذی در زمین از جمله زمین‌های کشاورزی.
- حفاظت از محیط زیست و صدور مجوز برای تنظیم فعالیت‌های مدیریت پسماند شامل تأسیسات هضم بیهوازی و تخلیه به هوا، زمین و آب؛
- تولید انرژی تجدیدپذیر.

۱۳- فصل سیزدهم : ملاحظات برنامه‌ریزی و انتخاب سایت

۱۳-۱- مقدمه

انتخاب سایت مناسب یکی از عوامل تأثیرگذار در موفقیت هر پروژه هضم بیهوازی است. انتخاب سایت همراه با برنامه‌ریزی دقیق در اوایل فرایند توسعه، ضامن دستاوردهای مطلوب است و از بروز اثرات نامطلوب و دیگر مشکلات بالقوه جلوگیری می‌کند. در این بخش ملاحظات کلی و معیارهای طراحی ویژه سایت برای انتخاب یک سایت مناسب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش بعدی، معیارهای طراحی ویژه سایت ارائه می‌شود.
در مرحله برنامه‌ریزی برای انتخاب سایت عوامل مختلف فنی، اجتماعی، محیط زیستی و اقتصادی در شکل‌گیری تصمیمات نقش خواهند داشت. متقاضیان تأسیسات هضم بیهوازی باید موارد زیر را در نظر داشته باشند:

- با کاربست ترکیبی از طراحی، روش‌های بهره‌برداری و در نظر گرفتن فاصله جدایی (حریم)[1]، اثرات نامطلوب تأسیسات بر کاربری زمین‌های همجوار، به ویژه زمین‌هایی که بر اساس نوع کاربری یا ویژگی‌های محیط زیستی حساس تلقی می‌شوند به حداقل رسانیده شود.
- تأسیسات هضم بیهوازی با چشم‌انداز پیرامون خود از جمله کارکردهای تجاری مشابه انطباق داشته و اهمیت جلوه بصری تأسیسات مد نظر قرار گیرد.
- محل احداث تأسیسات هضم بیهوازی منطبق بر نقشه رسمی شهری بوده و از آیین‌نامه‌های منطقه‌بندی محلی پیروی نماید.
- [از نظر حقوقی] در داخل سایت فضای کافی برای عقب‌نشینی‌ها، حق ارتفاق و دیگر مزاحمت‌ها، و [از نظر فنی] برای کلیه کارکردها از جمله انبارش فصلی و نگهداری اقلام ورودی و خروجی و فعالیت‌های تعمیر و نگهداری وجود داشته باشد.
- طرح‌های آبخیزداری و حفاظت از آب‌های سطحی و زیرزمینی و دیگر ویژگی‌های طبیعی در نظر گرفته شود.
- از بابت دسترسی راحت به مسیرهای حمل و نقل اطمینان حاصل شود.
- دسترسی به خوراک، بازارهای مصرف نهایی و تقاضای واقعی بازار برای مواد هضم‌شده و بیوگاز بررسی شود.

می‌توان برای انتخاب محل احداث تأسیسات هضم بیهوازی به مراکز دفن قدیمی پسماند، سایت‌های متروکه که قابلیت استفاده مجدد داشته باشند یا سایر زمین‌های غیرمثمر هم توجه کرد. البته ممکن است برای اجرای پروژه‌ها در برخی از این سایت‌ها نیاز به اخذ مجوزهای اضافی باشد.

۱۳-۲- حریم و منطقه حائل[2]

در مرحله برنامه‌ریزی یک پروژه برای ایجاد تأسیسات جدید هضم بیهوازی یا اصلاح تأسیسات موجود، در نظر گرفتن سلسله اقداماتی که در کنار هم، تأثیر نامطلوب تأسیسات جدید یا تأسیسات اصلاح‌شده را بر زمین‌های مجاور

[1] Separation Distance
[2] Buffer Zone

به حداقل برساند، امری حیاتی است. اثرات احتمالی که باید در نظر گرفته شود شامل کیفیت هوا، به ویژه بو، آب‌های سطحی و زیرزمینی، سر و صدا، ارتعاشات، نور، شکل ظاهری، ترافیک، حیوانات موذی و ناقل بیماری، گرد و غبار و زباله است.

برای به حداقل رساندن اثرات نامطلوب احتمالی تأسیسات هضم بیهوازی واقع‌بینانه نیست که صرفاً معیار حریم (فاصله جدایی) یا معیارهای طراحی و عملکردی تأسیسات در نظر گرفته شود. تحقیقات انجام‌شده بر روی تأسیسات موفق هضم بیهوازی که در حال بهره‌برداری هستند نشان می‌دهد ترکیبی از معیارهای طراحی و کارکردهای عملیاتی که بر مبنای مناطق حائل و حریم بین تأسیسات هضم بیهوازی و زمین‌های همجوار انتخاب شده باشند می‌تواند به طور مؤثر اثرات نامطلوب را به حداقل برساند.

با در نظر گرفتن مناطق حائل و حریم‌ها به طور طبیعی میزان انتشار از تأسیسات هضم بیهوازی و در نتیجه تأثیر نامطلوب آن بر اراضی همجوار کاهش می‌یابد. با توجه به توپوگرافی، پوشش گیاهی، ارتفاع، سرعت و جهت باد غالب در سایت و بسته به ویژگی‌های خاص مناطق حائل و حریم‌ها، امکان کاهش انواع خاصی از انتشارات می‌تواند متفاوت باشد.

کاربری اراضی در زمین‌های همجوار هر پروژه تأسیسات جدید یا تأسیسات اصلاح‌شده هضم بیهوازی مختص همان تأسیسات است و باید از نظر میزان حساسیت به اثرات احتمالی تأسیسات ارزیابی شود. توجه ویژه باید به کاربری‌هایی معطوف شود که به عنوان "گیرنده حساس[1]" در نظر گرفته می‌شوند. یک "گیرنده حساس" ممکن است یک خانه، اقامتگاه، مدرسه، مهد کودک، بیمارستان، آسایشگاه، خانه سالمندان، عبادتگاه، آرامستان، مراکز عمده‌فروشی یا مؤسسات اداری یا یک منطقه حساس محیط زیستی باشد.

در هنگام تبیین اهداف در فاز برنامه‌ریزی برای تأسیسات هضم بیهوازی باید به موضوع "گیرنده حساس" توجه داشت و مهم است که به یاد داشت که هر فردی ممکن است به طور بالقوه تحت تأثیر یک نوع از انتشار ناشی از تأسیسات قرار گیرد و آن انتشار را به وزارتخانه یا سازمان مربوطه گزارش دهد. باید توجه داشت که حساسیت به بو در افراد متفاوت است و ممکن است میزان تأثیر آن متفاوت باشد.

بهره‌بردار تأسیسات هضم بیهوازی معمولاً کنترلی بر برنامه توسعه‌ای املاک مجاور تأسیسات خود ندارد. بنابراین، تأسیسات باید با حداکثر منطقه حائل ممکن بین ساختمان‌های نیروگاه، مخازن فرآیندی، نقاط تخلیه آلاینده‌ها به هوا (به عنوان مثال، دودکش واحد تصفیه بو) و مرز املاک همجوار جانمایی شوند.

بنابراین، از طریق برنامه‌ریزی تأسیسات جدید یا اصلاح‌شده هضم بیهوازی می‌توان اطمینان حاصل کرد که ویژگی‌های طراحی و کارکردهای عملیاتی برای کاهش بو و سایر انتشارات- بدون آنکه کاهش طبیعی انتشارات حاصل از در نظر گرفتن مناطق حائل و حریم‌ها را تحت تأثیر قرار دهد- به طرز مؤثری توالی و شدت این انتشارات را به حداقل می‌رساند. بکارگیری سیستم‌های کاهش بوی بسیار مهندسی‌شده، این امکان را فراهم می‌کند که حتی تأسیسات هضم بیهوازی پسماند غذایی و آلی در مقیاس بزرگ در مقایسه با سایر تأسیسات پردازش پسماند، در مناطق شهری نسبتاً نزدیک به گیرنده‌های حساس استقرار یابند.

در جدول (۳-۱) ارتباط بین ویژگی‌های اصلی طراحی و کارکردهای عملیاتی تأسیسات هضم بیهوازی و الزامات حریم ارائه شده است.

[1] Sensitive Receptor

جدول)۱۳-۱(عوامل اصلی افزایش یا کاهش حریم مورد نیاز

نوع تأسیسات	فاصله تا نزدیکترین گیرنده حساس
اگر تأسیسات هضم بیهوازی کاملاً بسته باشد/ مجهز به یک سیستم تهویه باشد که در آن هوا در هر ساعت به دفعات تعویض گردد/ در تمام بخش‌های دریافت، بارگیری و فعالیت فشار هوا منفی باشد، و هوای تمام ساختمان‌ها و فرایندها قبل از تخلیه به محیط جمع‌آوری و تصفیه شود	نیاز به کمترین فاصله می‌باشد/ با افزایش ظرفیت تأسیسات، فاصله حریم‌ها افزایش می‌یابد
اگر تأسیسات هضم بیهوازی کاملاً بسته نباشد/ یا فقط بخشی از هوای ساختمان‌ها و فرایندها را جمع‌آوری و تصفیه کند یا نکند/ و فقط زائدات و ضایعات زراعی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی را دریافت و پردازش نماید	در مقایسه با حالت بالا نیاز به حریم با فواصل بیشتر دارد
اگر تأسیسات هضم بیهوازی کاملاً بسته نباشد، اما تمام هوای فرایندی را جمع‌آوری و تصفیه کند (شامل تمام هوایی که با مواد در حال نگهداری در انبار یا مواد مورد استفاده در فرایند در تماس است)/ و به غیر از زائدات و ضایعات زراعی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، مواد دیگر را دریافت و پردازش نماید	در مقایسه با حالت بالا نیاز به حریم با فواصل بیشتر دارد/ با افزایش ظرفیت تأسیسات، فاصله حریم‌ها افزایش می‌یابد
اگر در تأسیسات هضم بیهوازی هوای ساختمان‌ها یا هوای فرایندی اصلاً جمع‌آوری و تصفیه نشود و به غیر از زائدات و ضایعات زراعی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، مواد دیگر دریافت و پردازش شود	نیاز به بیشترین فاصله می‌باشد/ با افزایش ظرفیت تأسیسات، فاصله حریم‌ها افزایش می‌یابد

علاوه بر اندازه و نوع تأسیسات، معیارهای ذکرشده در جدول (۳-۲) نیز باید در تعیین حریم‌های مناسب به عنوان بخشی از روند برنامه‌ریزی و طراحی تأسیسات در نظر گرفته شوند.

جدول)۱۳-۲(دیگر معیارهای مؤثر بر اندازه حریم مورد نیاز

فاکتورهای مؤثر در کاهش اندازه حریم	فاکتورهای مؤثر در افزایش اندازه حریم
اگر گیرنده‌های حساس، نسبت به جهت بادهای غالب، در خلاف جهت باد قرار داشته باشند	اگر گیرنده‌های حساس، نسبت به جهت بادهای غالب، در جهت باد قرار داشته باشند
اگر برای تعیین حداقل حریم مورد نیاز، انتشارات مربوط به سایت، شامل انتشار بو، از طریق پایش یا مدلسازی تعیین گردد	اگر برای تعیین حداقل حریم مورد نیاز، انتشارات مربوط به سایت از طریق پایش یا مدلسازی تعیین نگردد
اگر عوارض زمین (توپوگرافی) و پوشش گیاهی منطقه حائل مناسب باشد، به عنوان مثال، عوارض زمین غیریکنواخت و دارای درخت باشد	اگر عوارض زمین (توپوگرافی) و پوشش گیاهی منطقه حائل مناسب نباشد، به عنوان مثال، زمین مسطح و باز و فاقد پوشش گیاهی باشد
اگر خوراک دریافتی بوی کمتری داشته باشد، به عنوان مثال موادی مانند زائدات کشاورزی که درصد کربن بالاتری دارند	اگر خوراک دریافتی پتانسیل تولید بوی بیشتری داشته باشد، به عنوان مثال موادی مانند پسماند غذایی و پوشک که درصد نیتروژن بالاتری دارند/ یا موادی مانند بخش فسادپذیر پسماند خانگی از مبدأ تفکیک‌شده، که مدت زمان بیشتری صرف نگهداری و حمل آنها می‌شود
اگر درجه بالایی از مهار و کنترل بو از زمان دریافت تا محصول نهایی صورت گیرد	اگر درجه بالایی از مهار و کنترل بو از زمان دریافت تا محصول نهایی صورت نگیرد
اگر تصفیه بو به شکل مؤثری انجام شود	اگر تصفیه بو به شکل مؤثری انجام نشود
اگر طراحی تأسیسات و سیستم کنترل بو مبتنی بر عملکرد موفق نیروگاه‌های مرجع نصب‌شده صورت گرفته باشد	اگر طراحی تأسیسات و سیستم کنترل بو نوآورانه باشد و از نظر تجاری، اثبات‌نشده باشد
اگر در طراحی و کارکردهای تأسیسات، انعطاف‌پذیری و افزونگی[1] لازم برای خرابی‌های غیرمنتظره در حین کار و تغییر خوراک یا شرایط بهره‌برداری دیده شده باشد	اگر انعطاف‌پذیری در طراحی و یا بهره‌برداری محدود باشد
اگر تمرکز جمعیت کم باشد و به طور ویژه گیرنده‌های حساس مانند بیمارستان‌ها در نزدیکی تأسیسات نباشد	اگر تمرکز جمعیت بالا باشد یا به طور ویژه تأسیسات در مجاورت گیرنده‌های حساس مانند بیمارستان‌ها باشد

[1] Redundancy

به متقاضیان تأسیسات هضم بیهوازی به شدت توصیه می‌شود که در مراحل اولیه برنامه‌ریزی جهت احداث تأسیسات و پیش از انتخاب سایت، با امور اراضی و اداره کل محیط زیست منطقه مشورت کنند تا مشخص گردد آیا طبق آیین‌نامه‌های ناحیه‌بندی یا قوانین مربوط به کاربری اراضی، الزامات خاصی برای فاصله‌گذاری تأسیسات از اماکن مسکونی یا سایر کاربری‌های اراضی اطراف تأسیسات وجود دارد یا محدودیت‌هایی برای بو یا سایر تأثیرات احتمالی تأسیسات وضع شده است. به عنوان یکی از مراحل دریافت تأییدیه[1] یا اصلاحیه تأییدیه موجود، متقاضیان موظف به ارائه مستنداتی هستند که اثبات کند تأسیسات جدید یا تأسیسات اصلاح‌شده آثار نامطلوبی بر کاربری‌های همجوار نخواهد داشت. با توجه به پتانسیل انتشار بو در تأسیسات، برای اثبات عدم وجود آثار نامطلوب، از مدلسازی انتشار بو بر اساس اطلاعات خاص سایت در مورد انتشار بوی تأسیسات، ویژگی‌های مناطق حائل و فواصل حریم‌ها و داده‌های هواشناسی استفاده می‌شود.
به کمک مدلسازی انتشار بو می‌توان "منطقه اثر[2]" اطراف تأسیسات را مورد ارزیابی قرار داد، که معمولاً منطقه‌ای در اطراف تأسیسات جدید یا تأسیسات اصلاح‌شده در نظر گرفته می‌شود که میزان انتشار بو در آن بیش از یک واحد بو[3] باشد. آگاهی از کاربری‌های موجود یا بالقوه در منطقه اثر، برای ارزیابی مناسب بودن یک سایت یا کفایت طراحی و کارکردهای عملیاتی برای کاهش بو بسیار مهم است. هنگام تفسیر نتایج حاصل از مدل انتشار بو باید احتیاط کرد زیرا این نتایج هیچ تضمینی برای این نیست که گیرنده‌های خارج از منطقه اثر، تأثیر بوی نامطبوع را تجربه نکرده یا گزارش نکنند.

۱۳-۳- نزدیکی به منابع اولیه و بازارهای نهایی محصول

مسافتی که ناوگان حمل و نقل تا / از تأسیسات هضم بیهوازی طی می‌کنند یا طول خط لوله یا خط برق مورد نیاز که باید نصب شود، می‌تواند به طور قابل توجهی هزینه‌ها و انتشارات مربوط به پروژه را افزایش یا کاهش دهد. این هزینه‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پایداری مالی تأسیسات هضم بیهوازی داشته باشد.
در برخی مناطق، مجاورت با حمل و نقل ریلی می‌تواند عامل مهمی در مکانیابی استقرار یک تأسیسات هضم بیهوازی باشد و انتقال خوراک و مواد هضم‌شده سرشار از مواد مغذی را تسهیل نماید.

۱۳-٤- انطباق با کاربری‌های همجوار

هنگام انتخاب یک سایت بالقوه، اهمیت کارکردی و بصری یک تأسیسات هضم بیهوازی بر چشم‌انداز محیط اطراف تأسیسات باید در نظر گرفته شود. فعالیت‌های یک تأسیسات هضم بیهوازی از نوع صنعتی است و به ساختمان‌ها و سازه‌هایی با ویژگی‌های مشابه نیاز دارد. اهمیت تأثیر جلوه بصری تأسیسات به مقیاس کاری، مکان احداث و بافت

[1] Application for Approval
[2] Zone of Impact
[3] Odour Unit (OU)

محلی فعلی بستگی خواهد داشت. به عنوان مثال، در طول شب روشنایی ناشی از سوزاندن گاز فلر ممکن است برای ساکنان محلی آزاردهنده باشد. در نتیجه لازم است به جای استفاده از فلر گازسوز نوع باز[1]، از فلر شعله مخفی[2] استفاده شود.
انتخاب دقیق سایت، همخوانی با زیرساخت (به عنوان مثال، نقشه معماری و طرح جانمایی تأسیسات) و محوطه‌سازی برای سنجش بصری می‌تواند اثرات مورد انتظار را به حداقل برساند.

۱۳-۵- انطباق با سیاستگذاری‌ها در بخش کاربری اراضی

قبل از انتخاب و خرید سایت، متقاضیان باید با الزامات قانونی و دستورالعمل‌های لازم‌الاجرا، از جمله برنامه‌ریزی کاربری اراضی، تأییدیه‌های محیط زیستی و ملاحظات مربوط به مشارکت عمومی در سطوح شهری، استانی و کشوری آشنا باشند.

- **در سطح شهری:** بر اساس قوانین شهری ممکن است در اراضی زیر که تحت عنوان "مناطق تصرف‌شده" شناخته می‌شوند محدودیت‌هایی برای توسعه اراضی در داخل یا در مجاورت آنها اعمال شود:
  - عوارض طبیعی باستانی یا محوطه‌های باستان‌شناسی
  - مناطق تعیین‌شده حساس از نظر محیط زیستی مانند تالاب‌ها
  - مناطق مورد علاقه طبیعی یا علمی

  متقاضیان در مراحل اولیه جهت شناخت رویه‌های مورد نیاز برای طراحی کاربری اراضی و آگاهی از تأییدیه‌های لازم که متضمن انتخاب مکان مناسب برای احداث تأسیسات در یک منطقه خاص می‌باشد باید با شهرداری آن منطقه مشورت کنند.
- **سازمان‌های حفاظتی:** سازمان‌های حفاظتی مانند سازمان حفاظت محیط زیست ممکن است با هدف کنترل سیلاب و حفاظت از محیط زیست، حوزه‌های آبریز و برخی از مناطق مهم از حیث محیط زیستی را تحت مدیریت داشته باشند. به طور کلی با استفاده از نقشه‌نگاری برخط[3] که در اختیار سازمان‌های حفاظتی قرار دارد می‌توان تعیین کرد که کدام بخش از یک سایت بالقوه در اختیار سازمان‌های حفاظتی قرار دارد یا کدام بخش در مجاورت زمینی قرار دارد که توسط سازمان‌های حفاظتی محافظت می‌شود.
- **در سطح استانی:** متقاضیان باید از قوانین استانی پیروی کنند. متقاضیان (در صورت لزوم) به عنوان بخشی از روال درخواست تأییدیه استانی، باید اثبات کنند که از استانداردهای لازم‌الاجرا پیروی می‌کنند و تأسیسات آنها اثر نامطلوبی نخواهد داشت. ممکن است مقررات استانی محافظت از کاربری اراضی در زمین‌های کشاورزی مطرح و جاری باشد. در بعضی از استان‌ها ممکن است مجوز خاصی برای ساخت یا بهره‌برداری لازم باشد.

[1] Open-burning Style Flare
[2] Shrouded Flare
[3] Online mapping

- **در سطح ملی:** در سطح ملی متقاضیان باید از قوانین ملی پیروی کنند. به عنوان مثال برای احداث تأسیسات هضم بیهوازی در نزدیکی فرودگاه باید با نهاد ذیربط هماهنگی‌های لازم بعمل آید.

۱۳-۶- امکان توسعه سایت

مهم است که سایت انتخاب‌شده به اندازه کافی بزرگ باشد تا امکان طراحی تأسیسات هضم بیهوازی و کلیه "الزامات کارکردی" فراهم باشد. الزامات کارکردی باید هم شامل تعمیر و نگهداری منظم و دوره‌ای و هم تعمیرات اساسی نامتداول باشد که ممکن است نیاز به فضای لازم برای چرخش کامیون و نصب جرثقیل موقت داشته باشد.
ممکن است بخش‌هایی از سایت برای توسعه محدودیت داشته باشند. به عنوان مثال محدودیت‌های مربوط به عقب‌نشینی، حق ارتفاق یا محدودیت‌های مربوط به شهرداری یا سازمان‌های حفاظتی محلی. پارکینگ، مدیریت آب‌های سطحی، حریم تأسیسات و سایر الزامات پهنه‌بندی نیز ممکن است زمین موجود برای تأسیسات هضم بیهوازی را کاهش دهد.

۱۳-۷- ملاحظات ترافیکی

میزان تردد در داخل و خارج از سایت می‌تواند منطقه پیرامون تأسیسات هضم بیهوازی را تحت تأثیر قرار دهد. اگر میزان تردد به طور جدی مدیریت نشود، کامیون‌ها می‌توانند سر و صدا ایجاد کنند، ردی از گل و لای و پسماند در داخل و خارج از سایت بجا بگذارند، گرد و خاک ایجاد کنند، باعث ریختن پسماند روی جاده‌ها شوند و منبع بالقوه‌ای برای بو باشند.
اگر حجم ترافیک به هر دلیلی- از جمله احتمال صف بستن کامیون‌های منتظر ورود به سایت- افزایش قابل توجهی داشته باشد، ممکن است منجر به اعتراض عمومی شود و برای صدور تأییدیه توسط برخی از نهادهای نظارتی استانی، مجاز نباشد. توسعه یک شبکه جاده‌ای جدید یا استفاده یا اصلاح شبکه جاده‌ای موجود و هزینه‌های مرتبط با آن، جزء ملاحظات انتخاب سایت است. علاوه بر این، جاده‌های منطقه ممکن است تحت ممنوعیت تردد جاده‌ای کامیون‌ها یا محدودیت‌های فصلی ظرفیت بار قرار بگیرند.
برای آن که ایجاد صف، سر و صدا و گرد و خاک در داخل سایت به حداقل برسد و امنیت تردد و دسترسی به وسایل نقلیه اضطراری مانند ماشین‌های آتش‌نشانی تضمین باشد لازم است مسیرهای داخل سایت یک شبکه کاربردی باشد که برای خودروهای حمل بار، کارکنان، تعمیرات و نگهداری و سایر موارد ایجاد ترافیک مناسب باشد.
علاوه بر جهات و نشانه‌های راهنمایی به محل سایت، عوامل ترافیکی خاص در داخل سایت که یک متقاضی می‌تواند در نظر بگیرد شامل موارد زیر است:

- اگر قرار به استقرار تأسیسات هضم بیهوازی در تأسیسات موجود یا سایت انتقال پسماند باشد باید کارکردهای فعلی، کاربری سایت و الگوهای ترافیکی در نظر گرفته شود.

- اوج ترافیک در داخل و خارج سایت برای طراحی چیدمان سایت و ویژگی‌های ترافیکی و برای زمان‌بندی تحویل و حمل به بیرون سایت برای به حداقل رساندن همزمان تعداد وسایل نقلیه در سایت در نظر گرفته شود.
- نباید هیچ صفی برای ورود خودروها به داخل سایت در جاده‌های عمومی تشکیل شود.
- فضای کافی برای صف انتظار وسائل نقلیه مقابل محل توزین، محل تخلیه و بارگیری مواد و برای گردش به راست یا گردش به چپ هنگام خروج از سایت و ورود به جاده‌های عمومی وجود داشته باشد تا در حد امکان تداخل با جریان ترافیک داخل و خارج از سایت به حداقل برسد.
- به منظور جلوگیری از ایجاد ترافیک و توقف در نزدیکی تأسیسات هضم بیهوازی و نقاط دسترسی به تجهیزات، فضای کافی برای تعمیر و نگهداری وسائل نقلیه در نظر گرفته شود.
- در صورت نیاز، فضای کافی بیرون از محدوده ترافیک، برای جابجا کردن تریلرهای خالی یا پر در نظر گرفته شود.
- در صورت نیاز، برای جلوگیری از تداخل با جریان ترافیک در داخل سایت، فضای کافی برای چرخش و دور زدن کامیون‌ها در نظر گرفته شود.
- تا حد امکان حرکت ترافیکی در یک جهت باشد تا تداخلات ترافیکی و احتمال تصادفات به حداقل برسد.
- برای به حداقل رساندن سر و صدا، گرد و خاک و دیگر عوامل آزاردهنده، همچنین به حداقل رساندن احتمال تصادفات در سایت، محدودیت‌هایی برای سرعت و زمان توقف از طریق نصب علائم در نظر گرفته شود.
- اطمینان حاصل شود که وسائل نقلیه خروجی از سایت تمیز هستند و ردی از گل و لای یا مواد متعفن در جاده‌های داخل و خارج سایت بجای نمی‌گذارند.

۱۳-۸- دسترسی به امکانات و خدمات شهری

نیاز به برق، گاز طبیعی، آب آشامیدنی، آب باران، فاضلاب بهداشتی و خدمات مخابراتی در تأسیسات هضم بیهوازی از عوامل حیاتی در روند انتخاب سایت است.

هنگام ارزیابی سایت‌های کاندیدا هم باید فاصله تا نقطه اتصال به تأسیسات خدمات شهری و هم ظرفیت موجود ارزیابی شود. آب آشامیدنی هم برای حفاظت در برابر آتش و هم برای نیازهای فرایندی باید در نظر گرفته شود زیرا در اغلب موارد حفاظت در برابر آتش است که الزامات خدمات آب مورد نیاز را تعیین می‌کند. توجه داشته باشید که برخی از سایت‌ها مانند تأسیسات هضم بیهوازی که در مزارع کشاورزی احداث می‌شوند فاقد امکاناتی مانند آب باران و فاضلاب بهداشتی هستند و برای بهره‌برداری از تأسیسات به این خدمات نیازی ندارند.

در صورت نیاز به دسترسی به بازارهای انرژی‌های تجدیدپذیر، اطمینان از اینکه شبکه‌های برق یا گاز طبیعی ظرفیت پذیرش یا ذخیره‌سازی برق یا RNG تولیدشده توسط تأسیسات هضم بیهوازی را دارند، مهم است. ممکن است شبکه‌های انرژی در مناطقی محدودیت داشته باشند و در نتیجه، امکان اتصال آنها به تأسیسات محدود داشته باشد. به عنوان مثال، ظرفیت خط لوله گاز طبیعی ممکن است به دلیل تقاضای پایین دستی- که ممکن است در ماه‌های

تابستان حداقل باشد- درست در زمانی که تقاضای انرژی در تأسیسات هضم بیهوازی هم کمترین مقدار است، محدود شود. ظرفیت شبکه از نظر کمی و کیفی مهم است.
نباید تصور کرد نزدیکترین خط خدمات شهری همان خطی است که ظرفیت پذیرش انرژی تجدیدپذیر را دارد. فقط اداره خدمات شهری محلی می‌تواند نقطه اتصال را تأیید کند و این کار معمولاً نیاز به انجام مطالعات ارزیابی اثر اتصال به شبکه یا ظرفیت شبکه پیش از تصمیم‌گیری نهایی دارد.
به متقاضیان پیشنهاد می‌گردد در مراحل اولیه فرایند برنامه‌ریزی خود، برای تأیید قطعی نقطه اتصال به شبکه پیشنهادی، ظرفیت خط محلی و شناخت فرایندهای برنامه‌ریزی و تأییدیه‌های مورد نیاز، با ادارات خدمات شهری منطقه خود مشورت کنند. زمان مورد نیاز برای تکمیل مطالعات ضروری و اخذ تأییدیه از ادارات خدمات شهری ممکن است قابل توجه باشد و در برخی موارد، ۱۲ تا ۲۴ ماه زمان لازم است.
تأسیسات هضم بیهوازی معمولاً برای پشتیبانی از اتوماسیون و پایش از راه دور تأسیسات، از جمله اعلان خطاها یا هشدارها، نیاز به دسترسی به اینترنت پرسرعت دارد. دسترسی به اینترنت پرسرعت در مناطق روستایی یا دورافتاده که دسترسی محدود به زیرساخت‌های اینترنت پرسرعت دارند می‌تواند یک چالش باشد.

۱۳-۹- سایر ملاحظات محیط زیستی

تأسیسات فراوری مواد آلی نباید در مناطقی جانمایی شوند که سابقه وقوع سیلاب در آنها وجود دارد، زیرا در صورت وقوع سیلاب احتمال آلوده شدن منطقه به دلیل آلایندگی ناشی از خوراک و سایر آلاینده‌ها وجود دارد. مقامات استانی و شهری معمولاً از توسعه تأسیسات مدیریت پسماند در مناطقی که به دلیل رخداد طوفان‌های شدید در معرض خطر سیلاب قرار دارند جلوگیری می‌کنند.
به دلیل احتمال رهاسازی کنترل‌نشده ممکن است فاصله حداقلی برای عقب‌نشینی از مسیل‌ها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، دریاها و تالاب‌ها برای جلوگیری از آلودگی‌های احتمالی ناخواسته در نظر گرفته شده باشد. تالاب‌ها تا حد زیادی به عنوان زیستگاه‌های حساس شناخته می‌شوند و بنابراین، در بیشتر محاکم قضایی توسعه تأسیسات فراوری مواد آلی در نزدیکی این زیستگاه‌ها محدود شده است. منابع آب آشامیدنی نیز باید از آلودگی احتمالی محافظت شود و در برخی از مقررات استانی و محلی فاصله لازم برای عقب‌نشینی از منابع آب آشامیدنی حداقل ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است. برای مقابله با آلودگی احتمالی، باید یک سپر عمودی محافظ یا یک لایه حفاظت ثانویه مهندسی‌شده در برابر آلاینده‌ها، بین فعالیت‌های سطحی و هرگونه سنگ بستر یا منابع آب زیرزمینی قرار داده شود. برای مدیریت نشت‌های احتمالی باید پروتکل‌های کنترل نشت تهیه و اجرا شوند.
هنگام آماده‌سازی برای مدیریت رواناب برف و آب‌های سطحی، باید ترکیب خاک در سایت شناسایی و مورد توجه قرار گیرد. در صورت نیاز، مناطق انباشت برف زمستانی و ذخیره آب برف ذوب‌شده و آب باران باید مورد توجه و مدیریت قرار گیرد.

۱۴- فصل چهاردهم : طراحی سایت و ملاحظات بهره‌برداری

۱۴-۱- مقدمه

در این بخش ملاحظات مهمی برای طراحی فیزیکی تأسیسات هضم بیهوازی- که معمولاً در "روند اقدام برای اخذ تأییدیه استانی" برای ساخت یا بهره‌برداری لحاظ می‌شود- معرفی می‌گردد. اطلاعات مورد نیاز برای چنین اقدامی شامل موارد زیر می‌گردد:

- **توصیف سایت:** موقعیت مکانی، انتخاب پهنه‌بندی و کاربری اراضی همجوار، فاصله و موقعیت گیرنده‌های حساس، زمین‌شناسی و مشخصات فیزیکی سایت، زهکشی و زمین‌شناسی آب[1]، الگوی بادهای محلی.
- **طراحی و چیدمان تأسیسات:** منابع، انواع و مقدار خوراک و مواد مصرفی، طراحی تأسیسات، ظرفیت، تجهیزات، دسترسی به سایت، امنیت.
- **بهره‌برداری از تأسیسات:** پارامترهای کارکردی، توصیف فرایند، پایش فرایند، کالیبراسیون و کنترل فرایند.
- **تضمین کیفیت:** کیفیت خوراک، انجام تست در محل سایت، پیشگیری از آلودگی متقابل، نمونه‌گیری و آنالیز محصول نهایی.
- **امنیت زیستی[2]:** اگر از یک کامیون حمل و نقل مشترک برای جمع‌آوری یا تحویل مواد از چندین مزرعه استفاده شود ممکن است کشاورزان برای حفظ برنامه‌های امنیت زیستی و جلوگیری از آلودگی متقابل دام‌های خود علاقمند باشند اطمینان حاصل کنند که این وسایل نقلیه در حد فاصل بین مزارع شسته می‌شوند.
- **برنامه تعمیر و نگهداری:** برنامه‌ای که به منظور پایش و مستندسازی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه و پیش‌بینی‌شده طبق توصیه‌های سازندگان اجرا می‌شود.
- **کنترل موارد آزاردهنده:** بو، پسماند، پرندگان، جانوران موذی و ناقل بیماری، گرد و خاک، سر و صدا و ترافیک.
- **برنامه‌های احتیاطی:** کمبود خوراک، فراوانی خوراک، نوسانات فصلی در میزان انبارش خوراک و مواد هضم‌شده، اختلال و بی‌نظمی در ذخیره‌سازی مواد هضم‌شده در بیرون از سایت، ساختار شکنی[3] در بازار، اختلال در [تأمین] نیروی کار، کارکرد نادرست (عیب فنی) تجهیزات، وضعیت جوی نامساعد شامل گردباد یا کولاک.
- **برنامه واکنش سریع (اضطراری):** آتش‌سوزی، نشتی و سیلاب.
- **مستندسازی:** نگهداری سوابق و گزارش‌نویسی به شیوه دستی و الکترونیکی.
- **تعطیلی سایت:** طرح‌هایی که مدیریت آنها "تا پایان دوره عمر[4]" یا "تا پایان دوره بهره‌برداری[5]" در سایت تضمین می‌کند سایت به دلیل الزامات محیط زیستی طولانی مدت بسته نمی‌شود. این طرح می‌تواند شامل پاک‌سازی و دفع کلیه پسماندهای موجود در سایت، شستشوی تجهیزات و دفع پسماند حاصل از شستشو و بررسی آلودگی خاک در صورت انباشت پسماند در فضای باز باشد.

[1] Drainage and Hydrogeology
[2] Biosecurity
[3] Disruption
[4] end-of-life
[5] end-to-operations

- **ارزیابی اثر بو:** برای تعیین حدود کنترل بو و فواصل عقب‌نشینی مورد نیاز باید مطالعه ارزیابی اثر بو انجام شود. کنترل بو و فواصل عقب‌نشینی را می‌توان طوری انتخاب کرد که اطمینان حاصل شود تأثیر بو بر کاربری‌های اطراف زیر آستانه مجاز قرار دارد. حدود مجاز معمولاً توسط نهادهای نظارتی استان تعیین می‌شود. در یک مطالعه ارزیابی اثر بو، نوع ترکیبات شیمیایی بودار در سایت، غلظت آنها و چگونگی انتشار هوایی بو بر اساس الگوی باد منطقه بررسی می‌شود. انجام این مطالعات می‌تواند به تهیه برنامه مدیریت و کنترل بو کمک نماید. این گزارش توسط یک متخصص واجد شرایط تهیه می‌گردد.
- **گزارش خلاصه انتشار و مدلسازی انتشار[1]:** این مطالعه که میزان انتشار آلاینده‌ها به جو از یک تأسیسات و نحوه پراکندگی آنها را پوشش می‌دهد برای ارائه به نهادهای نظارتی محیط زیستی استانی لازم است. الزامات خاص این مطالعه در آیین‌نامه‌ها ذکر شده است. این گزارش توسط یک متخصص واجد شرایط تهیه می‌گردد.
- **گزارش ارزیابی زمین‌شناسی آب:** در این مطالعه شرایط هیدروژئولوژیکی یک سایت بررسی می‌شود و در صورتی که محوطه انبارش مهندسی‌شده‌ای در تأسیسات در نظر گرفته نشده باشد نیاز به تهیه این گزارش می‌باشد که می‌بایست به سازمان‌های حفاظتی و نهادهای نظارتی محلی استانی ارائه شود. این مطالعه ممکن است شامل ارزیابی آب‌های زیرزمینی، چاه‌های محلی، حوزه‌های تغذیه آبخوان و ماهیت خاک‌های منطقه باشد. این گزارش توسط یک متخصص واجد شرایط تهیه می‌گردد.
- **گزارش ارزیابی صوتی:** عوامل ایجاد سر و صدا در تأسیسات هضم بیهوازی ممکن است وسایل نقلیه یا تجهیزات متحرک- که وارد سایت شده یا از آن خارج می‌شوند یا در حال کار در آن هستند- و یا تجهیزات ثابت- مانند موتور بیوگازسوز که برق تجهیزات تولید الکتریکی را تأمین می‌کند- باشند. گزارش ارزیابی صوتی را می‌توان برای تعیین حد مورد نیاز کاهش صدا انجام داد. متقاضیان برای اطمینان از اینکه تأسیسات آنها مطابق با آئین‌نامه‌ها و مقررات محلی کنترل صدا است باید با شهرداری‌ها و ادارت کل محیط زیست استان خود هماهنگی نمایند. اقداماتی که می‌تواند منجر به کاهش سر و صدا در یک تأسیسات شود شامل موارد زیر است:
  - ساعات کاری کاهش یابد یا بهره‌برداری با فعالیت‌های جانبی توأم باشد.
  - ترافیک ورودی و خروجی تأسیسات به ساعات مشخصی از روز محدود شود.
  - کلیه تجهیزات به طرز مناسبی نگهداری شوند.
  - تجهیزاتی شناسایی و خریداری شوند که در طراحی آنها ویژگی کاهش صدا (مانند صداگیر و محفظه صوتی) دیده شده باشد. محل استقرار فن‌ها و سایر تجهیزات دور از نزدیکترین نقطه پذیرش در نظر گرفته شود.
- **مطالعه آب باران و زهکشی در سایت:** در این مطالعه مهندسی، میزان بارش باران در شرایط معمول و شرایط بد آب و هوایی و مدل‌های تخلیه آب باران از سایت در هر دو شرایط پیش‌بینی می‌گردد. در این مطالعه حجم آب بارانی که در هنگام طراحی سایت باید در نظر گرفته شود و برای پیشگیری از وقوع سیلاب یا شستن جاده‌ها در زمان بهره‌برداری سایت مدیریت شود تعیین می‌گردد. مدیریت آب باران برای اطمینان از این که در شرایط بد آب و هوایی چاله‌ها، چاه‌های خشک و چاهک‌ها دچار سیلاب نمی‌شوند از نکات قابل

[1] Emission Summary and Dispersion Modelling (ESDM)

توجه در زمان طراحی تأسیسات است. تخلیه آب باران ممکن است نیاز به تأییدیه داشته باشد. باید توجه داشت که تأییدیه‌های تخلیه آب باران برای روان‌آب است و شامل شیرابه محل‌های نگهداری خوراک در فضای باز نمی‌شود.

- **خوراک:** نوع خوراک تعیین‌کننده طراحی، ظرفیت و نوع بسیاری از اجزای تأسیسات هضم بیهوازی می‌باشد. تجهیزاتی از تأسیسات هضم بیهوازی که بیشترین تأثیر را از نوع خوراک ورودی می‌پذیرند- و محدود به این تجهیزات هم نیستند- عبارتند از: محل دریافت و انبارش خوراک، تجهیزات پیش‌پردازش، سامانه هضم بیهوازی و سامانه‌های مدیریت مواد هضم‌شده. اپراتورهای تأسیسات هضم بیهوازی باید مطمئن باشند که ترکیب خوراک از نظر غذایی متعادل است و مقدار بیوگاز مطابق با انتظار برای رسیدن به اهداف کاری تولید خواهد شد. تغییر ماهیت خوراک می‌تواند یک چالش برای سیستم پیش‌پردازش باشد. از طراحان تأسیسات انتظار می‌رود در مورد خوراک‌هایی که تأسیسات قادر به پذیرش یا عدم پذیرش آن است، دقیق و شفاف باشند. به عنوان مثال، آیا وجود بسته‌بندی کاغذ یا پوشک در مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ قابل قبول است و به چه میزان؟ آیا قوطی‌های فلزی و بسته‌بندی پلاستیکی محصولات غذایی فاسدشده قابل قبول هستند؟ برای پاسخگویی به تغییرات آتی، طراحی باید انعطاف‌پذیر باشد. به عنوان مثال، پلاستیک‌های "قابل تجزیه[1]" جدید باید به عنوان بخشی از جریان خوراک مدیریت شود. به همین ترتیب، تغییر در شیوه‌های جمع‌آوری مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ و سهم تک خانوارها در مقابل سهم مجتمع‌های مسکونی، امکان جمع‌آوری پاک‌ترین جریان مواد آلی ممکن را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. ایجاد ریزپلاستیک‌ها و ذرات خارجی کوچک که به راحتی حذف نمی‌شوند باید با اتخاذ شیوه‌های مدیریت خوراک و مواد هضم‌شده، به حداقل رسانده شوند. ممکن است مصرف‌کنندگان نهایی و یا نهادهای نظارتی محدودیتی برای وجود مواد خارجی در مواد هضم‌شده قائل باشند.
- **الزامات دریافت انرژی تجدیدپذیر:** اتصال تأسیسات به خدمات شهری برای فروش برق، گاز، گرما یا سایر اشکال انرژی می‌تواند یکی از پیچیده‌ترین بخش‌های یک پروژه باشد. در خلال طراحی، دانستن نقطه تحویل، الزامات اتصال به شبکه و کیفیت توان و الزامات قراردادی که توسط شرکت خدمات شهری یا خریدار انرژی تحمیل می‌شود حائز اهمیت است. با توجه به مقررات شرکت گاز، ممکن است چالش‌های قانونی خاصی برای استفاده از RNG وجود داشته باشد. به عنوان مثال، در برخی مناطق امکان قانونی برای فروش RNG به قیمت بالاتر به مشتریانی که تمایل به خرید دارند وجود ندارد. به همین ترتیب، اگر بیوگاز در مناطقی توسط نهادهای نظارتی محلی یا شرکت گاز به عنوان اتلاف در نظر گرفته شود استفاده از آن را با مشکل مواجه خواهد کرد.
- **مصرف مواد هضم‌شده:** در یک پروژه هضم بیهوازی، توانایی مدیریت و بازاریابی مواد هضم‌شده جنبه مهمی از پروژه می‌باشد. برای هر نوع استفاده از مواد هضم‌شده شامل استفاده در زمین، کود و کمپوست، باید فضای کافی برای انبارش و حمل و نقل مواد هضم‌شده در طراحی دیده شود. برای مقابله با تغییرات احتمالی در شرایط بازار یا سایر مقتضیات، وجود یک برنامه احتیاطی برای جایگزین شدن با برنامه انبارش و استفاده از مواد هضم‌شده توصیه می‌شود. به عنوان مثال، وقوع تَرسالی ممکن است استفاده فصلی از مواد هضم‌شده در زمین را کند یا به تأخیر بیندازد. هر تأسیسات پرادازش مواد آلی باید برای بازاریابی مواد هضم‌شده یا

[1] Compostable

محصولات مشتق از آن، دارای یک برنامه قوی و قابل اعتماد باشد. این کار مستلزم درک واقعی از تقاضای بازار برای محصول و کیفیت مورد انتظار مشتریان است. به همین منوال، استانداردهای کیفیت محصول و انجام آزمون معمولاً در تأییدیه‌های محیط زیستی که برای بهره‌برداری از تأسیسات بیوگاز صادر می‌گردد ذکر می‌گردد. شکست در برنامه‌ریزی مؤثر و واقع‌بینانه برای بازاریابی محصول نهایی به سرعت مشکلاتی را بهمراه خواهد داشت، زیرا اختصاص فضا جهت انبارش مواد هضم‌شده برای بیش از چند ماه دشوار است.

- **طراحی بر اساس آیین‌نامه:** تأسیسات هضم بیهوازی باید با کلیه آیین‌نامه‌های مربوط به منطقه، الزامات طراحی، آیین‌نامه‌های ساختمانی قابل اجرا، ضوابط کیفری ساختمانی محلی، الزامات محیط زیستی و ایمنی مطابقت داشته باشد. به عنوان مثال، آیین‌نامه CSA Code B-149.6-15 بر طراحی و احداث تأسیسات هضم بیهوازی حاکم است و حداقل استانداردها را در کانادا وضع می‌کند. پیروی از این آیین‌نامه، طراحی و کارکرد ایمن و سازگار تأسیسات هضم بیهوازی را تضمین می‌کند. مطابق با آیین‌نامه، تجهیزاتی مانند شیرهای فشارشکن مورد نیاز هستند و باید فعال باشند.

۱۴-۲- اطلاعات مورد نیاز برای طراحی مقدماتی

الزامات خاص طراحی برای هر تأسیسات هضم بیهوازی بسته به نوع پروژه متفاوت خواهد بود. با این وجود، تقریباً در همه پروژه‌ها برای طراحی، باید اطلاعات مقدماتی مشخصی در مورد محل تأسیسات در نظر گرفته شود که در ادامه ذکر شده است:

- **بررسی سایت:** سایت باید کاملاً مشخص باشد و شناخت از گستره طبیعی (چشم‌انداز) و توپوگرافی سایت برای انجام بهترین طراحی تأسیسات حائز اهمیت است.
- **نقشه سایت:** در تهیه نقشه سایت یک تأسیسات هضم بیهوازی باید موارد زیر در نظر گرفته شوند تا اطمینان حاصل شود که جانمایی انجام‌شده در سایت، بهترین امکان برای مدیریت مکان تأسیسات را فراهم می‌نماید:
  - آماده‌سازی سایت بر اساس ارزیابی‌های ژئوتکنیکی همراه با نقشه جانمایی[1] و طرح شیب‌بندی[2]، برنامه‌ریزی و اجرا شود.
  - با هر گونه امکانات موجود در سایت ادغام شود.
  - چیدمان سایت طوری انجام شود که مدیریت بو تسهیل گردد. به عنوان مثال، ممکن است در مناطق شهری ترجیح داده شود مخازن در داخل سایت مستقر شوند و محل دفتر کار در جلوی تأسیسات قرار گیرد. ممکن است محل قرارگیری درب‌های ساختمان و دودکش خروجی تهویه هوا بر اساس موقعیت استقرار گیرنده‌های حساس همجوار تعیین شود.
  - مدیریت آب باران و شیرابه محل انبارش خوراک انجام شود.

[1] Design Layout
[2] Grading Plan

- **شناخت همسایگان اطراف و نقاط اثر احتمالی:** کنترل بو از درجه اول اهمیت برخوردار است و جلوگیری از انتشار بوی نامطبوع باعث می‌شود تا پروژه بدون تأثیر نامطلوب بر همسایگان به کار خود ادامه دهد. شناخت محلی که قرار است پروژه در آن احداث شود حائز اهمیت است، زیرا برای کاهش اثرات صدا و بو، کاهش دعاوی حقوقی و کاهش احتمال اقدام نظارتی و پیگرد قانونی، محیط اطراف می‌تواند بر طراحی و مکان استقرار تجهیزات تأثیرگذار باشد.
- **گزارش ژئوتکنیکی:** گزارش ژئوتکنیکی زمینی که قرار است تأسیسات هضم بیهوازی در آن بنا شود برای اطمینان از طراحی سازه‌ای و برای اهداف مدیریت مهار نشتی مورد نیاز است.
- **پهنه‌بندی سایت و تأییدیه‌های نقشه سایت:** درک پهنه‌بندی سایت و الزامات تأیید نقشه سایت به طراح این امکان را می‌دهد تا این عوامل را در هنگام طراحی در نظر بگیرد و از طراحی مجدد و هزینه‌های غیرضروری جلوگیری نماید.
- **الزامات برق سایت و تأسیسات پشتیبان موجود:** برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، شناخت الزامات برق سایت، وجود تأسیسات پشتیبان[1] و هزینه‌های این تأسیسات ضروری است و بر طراحی سیستم تأثیر می‌گذارد. تأسیسات هضم بیهوازی را می‌توان با منابع مختلف برق از جمله استفاده از برق و گرمای تولید شده از بیوگاز، که از شبکه برق یا از شبکه گاز طبیعی خریداری می‌شود، بهره‌برداری کرد.
- **الزامات مدیریت مواد مغذی:** شناخت الزامات محلی مدیریت مواد مغذی از دو جنبه ضرورت دارد: ۱) حصول اطمینان از حفاظت محیط زیستی زمینی که مواد هضم‌شده در آن استفاده می‌شود و ۲) کسب اطلاع از سطح پردازشی که روی مواد هضم‌شده انجام می‌شود. برای اطمینان از متناسب بودن تأسیسات مدیریت و نگهداری خوراک و مواد هضم‌شده با محدودیت‌های دسترسی به بازار و میزان مجاز / قابل استفاده مواد هضم‌شده در زمین برای مدیریت احجام، برنامه‌ریزی لجستیکی هم لازم است. پیشنهاد می‌شود در مورد برنامه‌های کاربست زمین با یک متخصص خاک‌شناسی حرفه‌ای یا سایر متخصصان دارای مجوز در حوزه اختیارات پروژه مشورت شود.
- **شرایط موجود سایت (در صورت وجود):** اضافه‌کردن فرایندها و تجهیزات جدیدی که با کارکردهای جاری هماهنگ باشد یک نکته اساسی است. کارکردهای جاری باید تکمیل گردند نه اینکه متوقف شوند.
- **مجوز اجتماعی:** موفقیت یک تأسیسات هضم بیهوازی بستگی به پذیرش آن از سمت جامعه محلی دارد. این پذیرش نیاز به رایزنی اجتماعی و برنامه‌های ارتباطی کارآمد و پیام‌رسانی در مراحل مختلف پروژه را برجسته می‌سازد. پیروی از کلیه الزامات حقوقی و محیط زیستی محلی روشی برای کمک به اطمینان از پذیرش اجتماعی است. به عنوان مثال، پروانه‌های ساختمانی و سایر پروانه‌های محلی برای تأسیسات هضم بیهوازی احتمالاً در صورت رعایت الزامات محلی اعطا می‌شود.
- **ترافیک در داخل یا خارج محدوده سایت:** یک تأسیسات هضم بیهوازی باید بگونه‌ای طراحی شود که امکان مدیریت مؤثر ترافیک در محدوده تأسیسات و در داخل سایت فراهم باشد. اگر قرار است تأسیسات در یک مکان مشترک، به عنوان مثال در سایت دفن موجود، احداث شود هر محدودیتی را می‌توان در نظر گرفت. برخی از مناطق دارای شیوه‌نامه‌های مختلف سر و صدا برای تردد کامیون‌ها در محل دفن پسماند هستند.

[1] Utilities

- **تراز جریان جرم و انرژی:** آنالیز خوراک در دسترس و حفظ و نگهداری یک ترکیب مغذی مناسب با بیولوژی فعال به دلیل الزامات طراحی لازم و ضروری است. اطمینان از اینکه خوراک‌های پیش‌بینی شده دارای ویژگی‌های زیر باشند حائز اهمیت است:

۱) برای رعایت الزامات موافقت‌نامه پیش‌خرید انرژی[1]، به میزان کافی بیوگاز تولید کنند.
۲) در صورتی که بیوگاز فروخته نمی‌شود برق و حرارت مورد نیاز تأسیسات را تأمین نماید.
۳) در صورتی که تولید بیوگاز دلیل اصلی اجرای پروژه نباشد خوراک‌ها به صورت ایمن با هم هضم خواهند شد تا الزامات مدیریت پسماند تأسیسات هضم بیهوازی محقق شود.

با انجام آنالیز جریان جرم می‌توان مطمئن شد که حجم، مساحت یا گنجایش مخازن نگهداری، متناسب با ظرفیت یا زمان ماند مورد نیاز برای فرایند انتخاب شده باشند. مخازن نگهداری مواردی از جمله الزامات پیش‌پردازش (به عنوان مثال، پاستوریزه کردن و یا هیدرولیز، اگر نیاز باشد)، تعیین اندازه هاضم بیهوازی و نگهداری مواد هضم‌شده پیش از استفاده در زمین یا تصفیه بیشتر را شامل می‌شود. نمودار جریان فرایند[2] یک نقشه مهندسی است که تمام جریان‌های جرمی داخل فرایند در آن ثبت می‌شود. در زمان طراحی سامانه‌های هضم بیهوازی که دارای تجهیزات بازیافت هستند احتیاط ویژه‌ای لازم است، به عنوان مثال بازیافت مواد هضم‌شده یا فاضلاب تصفیه‌شده به منظور آب‌رسانی به خوراک تازه ممکن است باعث انباشت مواد محلول یا ذرات ریز در طول زمان شده و فرایند هضم بیولوژیکی را مختل نماید. مشورت با یک کارشناس فنی برای طراحی سیستم‌هایی که دارای جریان‌های بازیافتی هستند توصیه می‌گردد.

انجام آنالیز جریان انرژی- ردیابی جرم و دمای مواد موجود در سیستم- برای تعیین نیازهای گرمایش یا سرمایش مورد نیاز در نقاط مختلف سیستم مفید خواهد بود. به عنوان مثال، تعیین انرژی مورد نیاز برای پاستوریزه کردن خوراک سرد از طریق گرمایش (در صورت لزوم) یا حفظ دمای هدف درون هاضم در اقلیم سرد حائز اهمیت است. به همین ترتیب، پساب خروجی هاضم ممکن است برای تصفیه هوازی فاضلاب بسیار گرم باشد. نمودار جریان انرژی یک نقشه مهندسی است که تمام جریان‌های انرژی داخل فرایند در آن ثبت می‌شود. در زمان طراحی سامانه‌های هضم بیهوازی که دارای تجهیزات بازیافت مانند بازیافت مواد هضم‌شده گرم یا فاضلاب تصفیه‌شده به منظور آب‌رسانی به خوراک تازه هستند، احتیاط ویژه‌ای لازم است.

پس از انجام آنالیز جریان جرم و انرژی، می‌توان نمودار لوله‌کشی و ابزار دقیق[3] را با هدف شناسایی و مستندسازی تجهیزات مورد نیاز برای احداث پروژه تهیه کرد.

- **استفاده از بیوگاز:** تعیین چگونگی استفاده از بیوگاز یک فاکتور مهم در طراحی است. کاربرد نهایی بیوگاز تولیدشده ممکن است گرم‌کردن دیگ بخار، استفاده در یک مولد تولید همزمان برق و حرارت[4] یا ارتقاء آن برای تولید گاز طبیعی تجدیدپذیر باشد.
- **خدمات آتش‌نشانی:** توصیه می‌شود هنگام طراحی تأسیسات هضم بیهوازی و پس از ساخت آن، اپراتوری برای بخش آتش‌نشانی در نظر گرفته شود. وجود بخش آتش‌نشانی به معنای اطمینان از این است که در طرح سایت، دسترسی به وسایل نقلیه واکنش اضطراری و دسترسی به آب برای مهار آتش دیده شده است.

[1] Energy Offtake Agreement
[2] Process Flow Diagram (PFD)
[3] Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)
[4] Combined Heat and Power (CHP)

پس از احداث، بازدید بخش آتش‌نشانی از تأسیسات به معنای اطمینان از آشنا بودن این بخش به وظایف، مخاطرات و برنامه‌ریزی احتیاطی مانند مسیرهای دسترسی و منابع آب اطفاء حریق است. بازدید بخش آتش‌نشانی از سایت این امکان را فراهم می‌کند که بخش‌های ویژه سایت مانند فلر، که استفاده از آنها ممکن است یک رخداد متداول و مورد انتظار در تأسیسات در هنگام راه‌اندازی و بهره‌برداری باشد، معرفی گردند. اطمینان از این که بخش آتش‌نشانی از تأسیسات هضم بیهوازی و کارکرد آن شناخت کافی دارد در هنگام نیاز به کمک آنها از هر نظر سودمند است.

۱۴-۲-۱- طراحی مقدماتی برای مدیریت خوراک

تأسیسات هضم بیهوازی می‌تواند پسماند آلی مایع و جامد را، که گاهی اوقات با مواد تجزیه‌ناپذیر زیستی مانند بسته‌بندی پلاستیکی مواد غذایی مخلوط می‌شود، دریافت کند. اگر خوراک فاقد مواد تجزیه‌ناپذیر زیستی مانند بسته‌بندی پلاستیکی باشد به آن در اصطلاح، "خوراک پاک[1]" گفته می‌شود. به طور کلی، این گونه پسماند آلی به عنوان "خوراک" شناخته می‌شود.

شناخت الزامات طراحی مقدماتی برای انبارش مناسب، پیش‌پردازش و ورود خوراک به فرایند هضم بیهوازی، برای کارکرد پیوسته تأسیسات ضروری است.

- **نوع خوراک:** خوراک‌ها را می‌توان به شکل زیر دسته‌بندی کرد:

- **مواد مایع پاک:** مانند فضولات دامی، آب‌های شستشوی فرایندی، چربی‌ها، روغن‌ها و گریس‌ها و لجن‌های فرآوری مواد غذایی قابل پمپ که همگی از طریق لوله‌کشی یا به وسیله کامیون‌های مخزن‌دار قابل ارسال به تأسیسات هضم بیهوازی هستند.
- **مواد جامد پاک:** مانند پوست سبزیجات، ضایعات غلات و سایر پسماندهای جامد مربوط به بخش فرآوری مواد غذایی- که کاملاً فاقد مواد تجزیه‌ناپذیر زیستی مانند پلاستیک و شیشه هستند- که همگی به وسیله کامیون‌های حمل پسماند جامد قابل ارسال به تأسیسات هضم بیهوازی هستند.
- **مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ:** که با سایر مواد آلاینده تجزیه‌ناپذیر زیستی مانند پلاستیک‌ها، شیشه، سرامیک‌ها و فلزات مخلوط می‌شوند. این دسته از خوراک از منظر روند تغییرات فصلی در مقدار و ترکیب، برنامه زمان‌بندی تحویل و انواع مواد آلاینده منحصر بفرد است. این دسته از پسماندهای جامد به وسیله کامیون‌های حمل پسماند جامد یا کامیون‌های جمع‌آوری پسماند قابل ارسال به تأسیسات هضم بیهوازی هستند.
- **پسماند برگ و حیاط:** این نوع پسماند را می‌توان به صورت جداگانه یا به همراه مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ جمع‌آوری کرد. سامانه‌های هضم بیهوازی با غلظت مواد جامد بالا[2] قادر به پردازش این نوع از پسماند هستند.
- **مواد جامد آلاینده:** مانند مواد جامد و مایع تجاری که شامل مواد تجزیه‌نلپذیر زیستی (به عنوان مثال، محصولات غذایی بسته‌بندی‌شده و پسماند سوپرمارکت‌ها) هستند و نیاز به باز کردن بسته‌بندی یا

[1] Clean Feedstock
[2] High Solids Anaerobic Digestions System

پردازش بیشتر دارند. این دسته از پسماندهای جامد به وسیله کامیون‌های حمل پسماند جامد قابل ارسال به تأسیسات هضم بیهوازی هستند.

متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پیچیده و فراوانی وجود دارد که هنگام آماده‌کردن دستورالعمل تهیه خوراک پیشنهادی برای هاضم بیهوازی باید در نظر گرفته شوند. مخلوط کردن پسماندهای مختلف با یکدیگر ممکن است نتایج و برهمکنش‌های پیش‌بینی‌نشده‌ای به دنبال داشته باشد. عدم درک درست از پیامدهای این متغیرها ممکن است اثرات منفی بر بیولوژی تأسیسات هضم بیهوازی و راندمان تولید بیوگاز داشته باشد. به متقاضیان پیشنهاد می‌گردد در صورتی که قصد دارند از خوراک‌های جدید استفاده کنند، با متخصصان مستقلی که شناخت عمیقی از نیازهای بیولوژیکی تأسیسات هضم بیهوازی دارند، مشورت کنند.

- **حمل و نقل، ذخیره‌سازی و تغذیه خوراک:** خوراک‌ها معمولاً با کامیون‌های بزرگ به تأسیسات هضم بیهوازی می‌رسند. فراهم کردن امکان تخلیه سریع و کارآمد خوراک در هنگام طراحی مهم است زیرا امکان نشتی و انتشار بوی مربوط به تخلیه خوراک را به حداقل می‌رساند و زمان سپری‌شده برای تحویل خوراک را کاهش می‌دهد که همین مسأله موجب کاهش احتمال ایجاد ترافیک در سایت می‌گردد. در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای انبارش و مرحله‌بندی[1] خوراک برای اطمینان از تغذیه پیوسته سامانه هضم بیهوازی و در نتیجه، ثابت نگهداشتن بیولوژی داخل فرایند هضم بیهوازی ضروری است. بهترین راه برای ایجاد پایداری بیولوژیکی سالم در تأسیسات هضم بیهوازی این است که تغذیه به صورت منظم و پیوسته با مقادیر کم از خوراک‌های کاملاً مخلوط‌شده انجام شود.

تمهیدات لازم برای ذخیره‌سازی خوراک‌های مایع و جامد به نحو مقتضی باید اندیشیده شود. پسماند مایع را می‌توان به داخل مخازن بالای سطح زمین پمپ کرد یا از طریق نیروی جاذبه به داخل استخرهای گیرنده[2] تخلیه نمود. در حالت ایده‌آل، هر مخزن نگهداری مایعات باید به نوعی مکانیزم برای همزدن مکانیکی مجهز باشد تا مواد داخل مخزن مخلوط شده و یکنواخت باقی بمانند. در مخازن نگهداری مایعات ممکن است گرمایش مورد نیاز باشد. مواد جامد حداقل باید روی یک سطح ناتراوا، مانند یک پد بتنی، که برای جذب و مدیریت روان‌آب به شیوه مناسبی طراحی شده باشد، نگهداری شوند. محل نگهداری مواد جامد باید از بارش‌های جوی در امان باشد تا از تولید شیرابه که نیازمند جمع‌آوری و تصفیه یا دفع است اجتناب گردد. باید به مقیاس مورد نیاز برای محل انبارش خوراک دقت شود تا هر گونه افزایش مورد انتظار در خوراک دریافتی، در حالی که هنوز امکان مدیریت مواد و جابجایی منظم پسماندهای انباشته‌شده وجود دارد، به سهولت پذیرش گردد.

اگر تأسیسات هضم بیهوازی در محلی در حال احداث است که نسبت به بو حساس است در آن صورت، توصیه می‌شود توجه زیادی به مدیریت بو برای کاهش بوی احتمالی ناشی از خوراک معطوف شود. به عنوان مثال، در مناطق شهری، این موضوع احتمالاً به این معنی است که ۱) تمام فعالیت‌های مرتبط با تخلیه خوراک باید در داخل یک ساختمان کاملاً بسته انجام شود، ۲) نگهداری خوراک هم در محیط کاملاً بسته باشد، ۳) در داخل ساختمان فشار هوا منفی باشد و هوای تخلیه ساختمان به سیستم کنترل بو هدایت شود،

[1] Staging
[2] Receiving Pit

۴) از پروتکل‌ها و چفت‌کننده‌هایی استفاده شود که تمامی درب‌های دسترسی به وسایل نقلیه و پرسنل، به جز زمانی که دربی در حال استفاده است، را بسته نگه دارد.

- **پیش‌پردازش خوراک:** پیش‌پردازش خوراک به کلیه اقداماتی گفته می‌شود که در صورت نیاز در حد فاصل پذیرش اولیه خوراک‌ها (خوراک بدون پردازش) و تغذیه خوراک‌های آماده‌شده (خوراک پردازش‌شده) به فرایند هضم بیهوازی انجام می‌شود. بسته به نوع کاربرد، پیش‌پردازش خوراک می‌تواند شامل طیف گسترده‌ای از فعالیت‌ها از جمله موارد زیر باشد:
  - مخلوط کردن خوراک‌های مختلف
  - آماده‌سازی (فرآوری) خوراک از طریق:
    - تبدیل خوراک جامد به مایع از طریق مخلوط کردن آن با آب یا با خوراک‌های مایع دیگر برای استفاده در سامانه‌های هضم بیهوازی تر.
    - تبدیل خوراک جامد به قطعات کوچکتر به وسیله خرد کردن یا آسیاب کردن پیش از تغذیه آن به سامانه‌های هضم بیهوازی با درصد مواد جامد بالا. در سامانه‌های هضم بیهوازی با درصد مواد جامد بالا در صورتی که غلظت مواد جامد از حد بالایی غلظت بیشتر شود نیاز به اضافه کردن آب به فرایند خواهد بود.
  - پیشاپیش مواد خارجی یا تجزیه‌ناپذیر زیستی مانند پلاستیک‌ها، شیشه، سرامیک‌ها و فلزات از خوراک با استفاده از سرندها جدا شوند.
  - در صورت نیاز یا پیشنهاد، پاستوریزه کردن خوراک و یا استفاده از فرایند هیدرولیز.

برخی از ملاحظات طراحی برای پیش‌پردازش خوراک باید شامل موارد زیر باشد:

- **یکنواختی خوراک:** در هنگام طراحی باید مطمئن شد که خوراک، بیشترین یکنواختی ممکن را داراست زیرا هر اقدامی که برای مخلوط کردن یا یکنواخت کردن خوراک پیش از تغذیه به تأسیسات هضم بیهوازی انجام شود موجب پایداری بیولوژیکی فرایند خواهد شد. در عمل یکنواختی خوراک ممکن است از طریق مخلوط کردن خوراک‌های مایع مختلف پیش از تغذیه آن به فرایند هضم بیهوازی حاصل شود. مخلوط کردن خوراک‌ها از بروز هر گونه شوک ناشی از بارگذاری بر بیولوژی فرایند– که ممکن است صرفاً نتیجه تزریق یک خوراک نامتعارف باشد– جلوگیری می‌کند. در فرایند هضم بیهوازی تر، مخلوط کردن خوراک‌های جامد با خوراک‌های مایع دیگر، یا با آب یا با مواد هضم‌شده برای تهیه دوغاب پیش از تغذیه مواد به فرایند هضم بیهوازی، متداول است. در برخی موارد، لازم است خوراک‌های جامدی که به طور مستقیم به فرایند هضم بیهوازی تغذیه می‌شوند از قبل خرد شده یا اندازه آنها کاهش یابد تا اطمینان حاصل شود که خوراک‌ها برای مخلوط شدن با مواد هضم‌شده مایع حاصل از فرایند هضم بیهوازی آماده هستند. در سامانه‌های هضم بیهوازی با درصد مواد جامد بالا، خوراک‌های جامد از پیش خردشده، مستقیماً به داخل هاضم بیهوازی اضافه می‌شوند.
- **حذف مواد آلاینده:** در طراحی تأسیسات هضم بیهوازی باید به این موضوع پرداخته شود که حذف مواد آلاینده تجزیه‌ناپذیر زیستی مانند پلاستیک‌ها، شیشه، فلزات، سرامیک‌ها و سنگ‌ریزه باید قبل از ورود خوراک به تأسیسات هضم بیهوازی انجام شود، پس از ورود خوراک به تأسیسات هضم بیهوازی انجام شود یا با ترکیبی از این دو روش انجام شود.

- **کاهش پاتوژن‌ها و پاستوریزاسیون:** نیاز به پاستوریزه کردن یا روش‌های دیگر کاهش پاتوژن‌ها بستگی به نوع فناوری هضم بیهوازی، نوع خوراک، نوع کاربرد خروجی‌ها و حوزه قانونگذاری دارد[1]. به عنوان مثال، طیف وسیعی از پاتوژن‌ها در خوراک‌های گوشتی خام یا مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ که حاوی پسماندهای انسانی- مانند پوشک‌های آلوده[2]، پوشینه دفعیات غیرارادی مصرف‌شده[3] یا محصولات بهداشتی مصرف‌شده[4]- است وجود دارد و گاهی اوقات پاستوریزه کردن توسط قانونگذاران الزامی می‌شود. در صورت نیاز به پاستوریزه کردن، می‌توان عمل پاستوریزه کردن را قبل، داخل هاضم یا بعد از فرایند هضم بیهوازی انجام داد. ممکن است سازمان نظارتی انجام منظم آزمایش پاتوژن در مواد هضم‌شده را الزام نماید. در رویه متداول پاستوریزه کردن، مواد یا باید به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد یا به مدت یک ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شوند.

علاوه بر پاستوریزه کردن، می‌توان از سایر فناوری‌های کاهش پاتوژن مانند تولید کمپوست هوازی، تثبیت قلیایی یا سایر روش‌ها استفاده کرد.

۱۴-۳- مؤلفه‌های اصلی طراحی تأسیسات هضم بیهوازی

تأسیسات هضم بیهوازی چیدمانی از تجهیزات است که برای پردازش ترکیب بسیار خاصی از مواد قبل و بعد از هاضم بیهوازی انتخاب و تنظیم می‌شوند. تجهیزاتی که سامانه هضم بیهوازی را تشکیل می‌دهند تحت عنوان بخش پیش‌پردازش، بخش هضم بیهوازی و بخش پس‌پردازش- شامل آب‌گیری و در برخی موارد، تصفیه فاضلاب- شناخته می‌شوند.

مؤلفه‌های اصلی در طراحی تأسیسات هضم بیهوازی عبارتند از:

- **انواع روش‌های هضم بیهوازی:** فرایندهای هضم بیهوازی بر اساس شاخص‌های زیر دسته‌بندی می‌شوند:
  - دمای کاری
  - درصد غلظت مواد جامد یا مایع
  - تعداد مراحل فرایند هضم بیهوازی
- **محدوده دمایی هضم بیهوازی:** هضم بیهوازی در یکی از سه محدوده دمایی تعریف‌شده زیر به صورت گسترده انجام می‌شود:
  - محدوده دما پایین (سرمادوست[5]): دمای کمتر از ۲۵ درجه سانتیگراد
  - محدوده دما متوسط (میاندوست[6]): دمای بین ۳۰ تا ۴۲ درجه سانتیگراد
  - محدوده دما بالا (گرمادوست[7]): دمای بیشتر از ۴۸ درجه سانتیگراد

[1] Regulatory Jurisdiction
[2] Soiled Diaper
[3] Used Incontinence Product
[4] Used Sanitary Product
[5] Psychrophilic
[6] Mesophilic
[7] Thermophilic

در حالت کلی، فرایند تجزیه زیستی در دماهای بالاتر، سریعتر است. اگر دمای فرایند بالاتر باشد نیاز به زمان ماند کوتاهتری در فرایند هضم بیهوازی خواهد بود. در روش گرمادوست (ترموفیلیک)، هضم بیهوازی مخلوط پسماندهای غذایی در کمتر از دو هفته صورت می‌گیرد؛ در حالی که فرایندهای سرمادوست ممکن است تا سه ماه طول بکشد. تأسیسات هضم بیهوازی موجود در ایران عمدتاً ترکیبی از فرایندهای مزوفیلیک و ترموفیلیک هستند. محدوده دمایی ترموفیلیک نرخ تخریب مواد جامد فرار (VS)[1] و تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD)[2] را افزایش می‌دهد. نرخ تخریب بالاتر منجر به کوچکتر شدن اندازه راکتور می‌شود و در مقایسه با سامانه هضم مزوفیلیک، امکان پاستوریزه کردن و کاهش پاتوژن‌ها را فراهم می‌کند. بالاتر بودن نرخ هضم در یک فرایند ترموفیلیک سبب می‌شود فرایند هضم سریعتر از فرایندهای مزوفیلیک که در دماهای متوسط انجام می‌شود، ناپایدار شود. به همین دلیل، بسیاری از تأسیسات هضم بیهوازی در دنیا از فرایند مزوفیلیک با پایداری بهبودیافته استفاده می‌کنند.

برای انتخاب رژیم دمایی ایده‌آل در یک پروژه مشخص، چندین فاکتور باید در نظر گرفته شود. در جدول (۴-۱)، سامانه‌های دما بالا و دما متوسط با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تعیین رژیم دمایی مناسب برای یک تأسیسات هضم بیهوازی مفروض مستلزم آنالیز خوراک در دسترس و ایجاد توازن بین بیشینه‌کردن تولید بیوگاز و حفظ ثبات و صرفه اقتصادی خواهد بود.

توجه داشته باشید که در هر دو فرایند مزوفیلیک و ترموفیلیک، امکان تولید بیوگاز به میزان کاملاً برابر از یک نوع خوراک وجود دارد، با این تفاوت که در فرایند ترموفیلیک بیوگاز سریعتر تولید می‌شود.

جدول)۱۴-۱(مقایسه بین سامانه‌های هضم مزوفیلیک و ترموفیلیک

سامانه‌های هضم مزوفیلیک (۳۰-۴۲ °C)	**سامانه‌های هضم ترموفیلیک (> ۴۸ °C)**
مزایا	**مزایا**
▪ جمعیت باکتریایی بادوام‌تر و انطباق‌پذیری آنها با تغییر شرایط ورودی بیشتر است ▪ برای نگهداشت دما نیاز به انرژی کمتری است ▪ حساسیت کمتری به مقدار نیتروژن در خوراک وجود دارد ▪ نیاز کمتری به پایش و کنترل شدید دارد	▪ بالاتر بودن دما با تسریع کردن فرایند بیولوژیکی موجب افزایش نرخ تولید بیوگاز می‌شود؛ رسیدن به زمان‌های ماند کمتر مقدور می‌شود ▪ پاستوریزه کردن در داخل هاضم ▪ نرخ بازدهی بالاتر
معایب	**معایب**
▪ مقادیر کمتر نرخ تولید گاز؛ برای دستیابی به نرخ یکسان، نیاز به زمان ماند بیشتری دارد ▪ نرخ بازدهی کمتر ▪ مواد هضم‌شده حاصله ممکن است نیاز به پردازش بیشتری داشته باشد	▪ هزینه‌های ساخت به دلیل نیاز به مواد مقاوم در برابر حرارت، بالاتر است ▪ برای رسیدن به محدوده دمایی ترموفیلیک نیاز به انرژی بیشتری برای گرمایش است ▪ حساسیت بیشتری به مقدار نیتروژن در خوراک دارد ▪ نیاز بیشتری به پایش و کنترل شدید دارد

[1] Volatile Solids (VS)
[2] Chemical Oxygen Demand (COD)

- **گزینه‌های گرمایش تأسیسات:** در نظر گرفتن نیازهای حرارتی فرایند پاستوریزه کردن، مخازن هاضم، مخازن آب فرایندی، ساختمان‌های فرآورش و هر بخش دیگری در داخل تأسیسات هضم بیهوازی حائز اهمیت است. به همان نسبت، بهره‌وری انرژی در داخل تأسیسات از جمله اقداماتی مانند عایق‌کاری هاضم‌ها و مخازن دیگر، بازیابی حرارت و استفاده از بیوگاز برای گرمایش حائز اهمیت است. محاسبه نیازهای گرمایشی و سرمایشی فصلی بخشی از آنالیز جریان انرژی تأسیسات در مراحل اولیه کار برنامه‌ریزی و طراحی است.

به روش‌های مختلف می‌توان گرمایش تأسیسات هضم بیهوازی را انجام داد. در بسیاری از هاضم‌های کوچکتر، لوله‌گذاری درجا[1] مستقیماً در کف و یا دیواره‌های هاضم برای گرمایش فرایند انجام می‌شود. در برخی از هاضم‌ها آب داغ از طریق لوله‌کشی فولاد ضدزنگ که در تماس با مواد هضم‌شده در داخل مخزن هاضم هستند، بازچرخانی می‌شود. معمولاً برای هاضم‌های بزرگتر از روش بازچرخانی مواد هضم‌شده به وسیله مبدل‌های حرارتی خارجی استفاده می‌شود. منبع تأمین گرما می‌تواند دیگ بخار بیوگازسوز یا گازسوز یا حرارت تلف‌شده یک کمپرسور یا مولد تولید همزمان برق و حرارت (CHP) باشد.

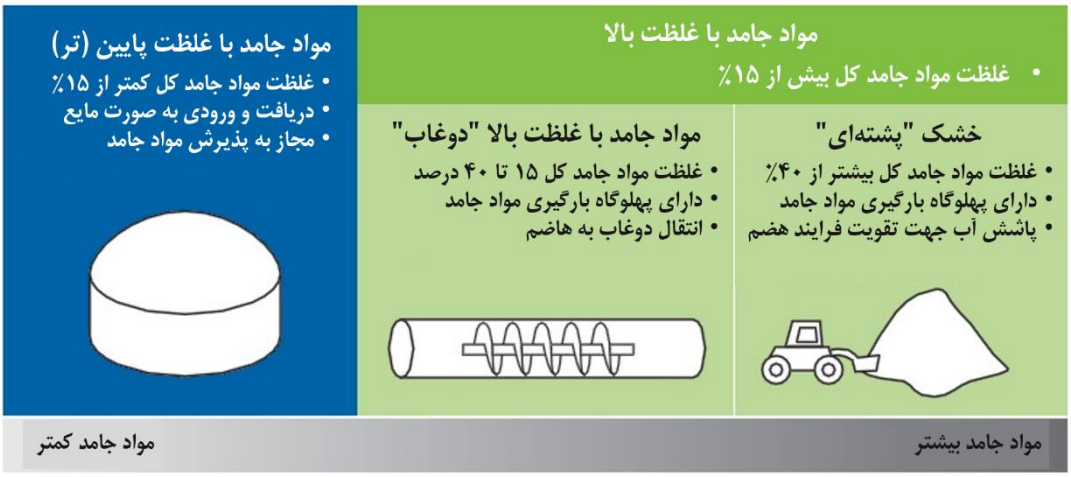
استفاده از گرمایش درون هاضم یا گرمایش درجا نمونه‌ای از موارد همپوشانی است که در مبادلات ساختمانی رخ می‌دهد. بسته به دامنه کار تعریف‌شده در قرارداد، لوله‌گذاری برای گرمایش ممکن است توسط پیمانکار تأسیسات مکانیکی یا پیمانکار ساختمانی مخزن انجام شود.

سیستم کنترل گرمایش، توزیع گرما در کل تأسیسات هضم بیهوازی و گرمای ورودی برای نگهداشت دماهای هدف در فرایندهای مختلف هضم بیهوازی را کنترل می‌کند. برای طراحی و دستیابی به کنترل بهینه، ترکیبی از شیرهای کنترل جریان، پمپ‌های دور متغیر، ترموکوپل‌های اندازه‌گیری دما و دستگاه کنترل‌گر قابل برنامه‌نویسی استفاده می‌شود. برای حفظ پایداری بیولوژیکی و تولید پیوسته بیوگاز، کنترل پیوست دما لازم است.

- **سامانه‌های هضم بیهوازی با غلظت مواد جامد بالا و غلظت مواد جامد پایین:** فرایندهای هضم بیهوازی را می‌توان بر اساس میزان غلظت مواد جامد و مایع مواد هضم‌شده حاصل از فرایند دسته‌بندی نمود:
  - فرایند با غلظت مواد جامد پایین یا "تر" با درصد مواد جامد کل (TS)[2] کمتر از ۱۵٪
  - فرایند دوغابی با غلظت مواد جامد بالا با درصد مواد جامد کل (TS) بیشتر از ۱۵٪
  - فرایند "خشک" یا "پشته‌ای[3]" با درصد مواد جامد کل (TS) بیشتر ۴۰٪

فرایند هضم بیهوازی "خشک" یا "پشته‌ای" یک نوع یا یک زیرمجموعه از هضم بیهوازی با غلظت مواد جامد بالا است.

[1] Cast in Place Tubing
[2] Total Solids (TS)
[3] Stackable



شکل (۱۴-۱) انواع هاضم‌های بیهوازی با درصد مواد جامد

هاضم‌های بیهوازی بر اساس سه دسته‌بندی که در بالا ذکر شد طبقه‌بندی می‌شوند:

- **هضم تر یا غلظت مواد جامد پایین:** در فرایندهای هضم تر درصد مواد جامد کل کمتر از ۱۵٪ (۱۵۰٫۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) است، اگر چه اکثر سامانه‌های هضم تر معمولاً با درصد مواد جامد کل کمتر از ۱۲٪ (۱۲۰٫۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) کار می‌کنند. این نوع از فرایندهای هضم بیهوازی معمولاً با استفاده از مخازن نگهداری که عملیات اختلاط در آنها به خوبی انجام می‌شود، ساخته می‌شوند. استخرهای بیهوازی[1] نمونه دیگری از فرایند هضم تر است. در فرایند هضم تر برای دستیابی به اختلاط کامل در فرایند هضم بیهوازی، از دوغاب‌هایی با TS پایین استفاده می‌شود که امکان همزدن پیوسته مواد هضم‌شده را فراهم می‌کند. با استفاده از عملیات همزنی از ته‌نشین شدن مواد جامد سنگین و سنگریزه در کف و تشکیل لایه شناور[2] متشکل از اجزاء سبک در سطح هاضم جلوگیری می‌شود.
- **هضم دوغاب با غلظت مواد جامد بالا:** فرایندهای هضم دوغابی با غلظت مواد جامد بالا در سامانه‌هایی استفاده می‌شود که غلظت مواد جامد خشک در آن بین ۱۵ تا ۴۰٪ (۱۵۰٫۰۰۰ تا ۴۰۰٫۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر یا میلی‌گرم بر کیلوگرم) باشد. این نوع فرایند اغلب در راکتورهای جریان قالبی[3] یا هاضم‌های غلظت بالا- که می‌توانند عمودی یا افقی باشند- کار می‌کند. در راکتورهای جریان قالبی عمودی همزنی بسیار کم و تنها برای حرکت آهسته مواد از بالا به پایین مخزن هاضم انجام می‌شود. مخازن جریان قالبی عمودی اغلب قاعده مخروطی دارند که خروج مواد هضم‌شده را تسهیل می‌کند. اصول کارکرد راکتورهای جریان قالبی افقی مانند راکتورهای جریان قالبی عمودی است با این تفاوت که راکتورهای افقی، مخازن استوانه‌ای افقی نسبتاً بلند و باریک با بازوهای پارویی کاملاً فاصله‌دار هستند.
- **هضم خشک:** در هضم خشک یا فرایندهای پشته‌ای، غلظت مواد جامد خشک بیشتر از ۴۰٪ (> ۴۰۰٫۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. هضم خشک در هاضم‌های خشک انجام می‌شود که از نظر طراحی شبیه مخازن تولید کمپوست هستند، اما در محیط بیهوازی کار می‌کنند. معمولاً برای پردازش مواد آلی

[1] Anaerobic Lagoon
[2] Floating Crust
[3] Plug Flow

تفکیک‌شده در مبدأ با استفاده از هضم خشک، نیاز به افزودن مقداری پسماند برگی و باغبانی است تا غلظت TS به سطح مورد نیاز افزایش یابد.

تفاوت اصلی بین انواع سامانه‌های هضم بیهوازی، نوع اختلاطی است که با افزایش ویسکوزیته (گرانروی) برای عمل‌آوردن مواد مورد نیاز است. به عنوان مثال، انجام فرایند اختلاط مواد با گاز تنها در فرایند هضم تر با غلظت مواد جامد پایین مناسب است، در حالی که بارگیری و تخلیه مواد در راکتور هضم خشک معمولاً با استفاده از تجهیزات خاک‌برداری مانند لودرهای با تخلیه از جلو انجام می‌شود.

- **رژیم جریان اختلاط:** عمل اختلاط به دلایل زیادی در یک هاضم لازم است. عمل اختلاط سبب می‌شود مواد آلی پردازش‌نشده مخلوط شده، شناور شده و همگن شوند. عمل اختلاط کمک می‌کند دما در داخل هاضم به صورت یکنواخت توزیع شود و زیست‌توده هضم‌شده را در تماس نزدیک با مواد آلی پردازش‌نشده قرار می‌دهد. اگر عمل اختلاط به خوبی صورت گیرد سبب می‌شود غلظت مواد جامد در کل هاضم یکنواخت گردد.

انواع مختلفی از فناوری اختلاط از سیستم‌های تزریق گاز گرفته تا اختلاط مکانیکی وجود دارد که برخی از آنها به شرح زیر است:

- **اختلاط با گاز:** در این روش، از یک کمپرسور گاز برای بازچرخانی بخشی از بیوگاز هاضم استفاده شده و بیوگاز به نزدیکی کف راکتور تزریق می‌شود. پس از تزریق، حباب‌های بیوگاز از میان مواد هضم‌شده بالا آمده و سبب اختلاط محتویات هاضم می‌شود. روش اختلاط با گاز تنها برای هاضم‌های با غلظت مواد جامد پایین مناسب است.
- **اختلاط خطی عمودی:** در این روش، یک دیسک تخت که به یک محور عمودی متصل است، در اعماق مخزن هاضم قرار داده می‌شود. سپس محور عمودی مانند یک پیستون، به وسیله یک موتور پیشران که در قسمت فوقانی مخزن تعبیه شده است، به بالا و پایین حرکت داده می‌شود.
- **اختلاط هیدرولیکی:** در این روش، از تعدادی نازل و پمپ که چیدمان خاصی دارند برای بیرون کشیدن مواد هضم‌شده از مخزن هاضم و پمپ مجدد آن به داخل هاضم با سرعت بالا استفاده می‌شود. به کمک الگوی جریان ایجادشده می‌توان محتویات داخل هاضم را در مسیر دایره‌ای به حرکت درآورد.
- **اختلاط مکانیکی:** در این روش، از یک پروانه که به وسیله یک موتور حرکت می‌کند برای اختلاط مکانیکی استفاده می‌شود. بسته به طراحی مخلوط‌کن[1]، سرعت اختلاط و گشتاور مورد نیاز ممکن است موتور مستقیماً به محور مخلوط‌کن وصل شده یا از یک جعبه‌دنده یا سیستم پولی استفاده شود. استفاده از مخلوط‌کن‌های مکانیکی رایج‌ترین روش برای عمل اختلاط در هاضم‌های تر و کوچکتر است. این نوع مخلوط‌کن‌ها می‌توانند به همراه موتور و پروانه کاملاً در هاضم غوطه‌ور باشند یا ممکن است موتور آنها بیرون از هاضم نصب شده و محور محرک آنها از دیواره هاضم عبور داده شود. در اغلب موارد در هاضم‌های با غلظت مواد جامد بالا از یک همزن مکانیکی افقی استفاده می‌شود که موتور محرک آن بیرون از مخزن تعبیه شده است.

هنگام تعیین نوع مخلوط‌کن در یک پروژه مشخص، باید عملیات تعمیر و نگهداری و دسترسی آسان در نظر گرفته شود.

[1] Mixer

- علاوه بر اختلاط پیوسته، در طراحی برخی از هاضم‌های تر، یک مخزن خودپاک‌شونده[1] در نظر گرفته می‌شود. در طراحی مخازن خودپاک‌شونده امکان انباشت مقادیر کم از ذرات سنگین متراکم و مواد آلاینده شناور وجود دارد و این مواد با استفاده از کفابروهای سطحی[2] و یا کف‌تراش‌ها[3] برای خروج از مخزن، به محل جمع‌آوری هدایت می‌شوند.
- **فرایندهای هضم بیهوازی تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای:** هضم بیهوازی یک فرایند بیولوژیکی چهار مرحله‌ای است. این فرایندها می‌توانند در یک یا چند مخزن رخ دهند. در یک سامانه هضم بیهوازی تک مرحله‌ای، کل فرایند هضم بیولوژیکی در یک مخزن انجام می‌شود. از آنجا که کلیه فرایندها در یک مکان انجام می‌شوند، به طور کلی هزینه این سامانه‌ها کمتر و نگهداری آنها در مقایسه با سامانه هضم بیهوازی چند مرحله‌ای آسانتر است. انواع مختلفی از هاضم‌های تک مرحله‌ای شامل راکتورهای اختلاط کامل و هاضم‌های جریان قالبی وجود دارد.

پیش‌فرض سامانه هضم بیهوازی چند مرحله‌ای- که چند فازی هم نامیده می‌شود- بهینه کردن شرایط برای هر واکنش بیولوژیکی در مخازن مختلف است. برای بیشینه کردن نرخ تولید بیوگاز و سرعت تجزیه مواد هضم‌شده و در عین حال، کاهش هزینه و فراهم کردن امکان کارکرد پایدار، پیکربندی‌های فرایندی متعدد همراه با مخازن مختلف که در محدوده دمایی و pH متفاوت کار می‌کنند، وجود دارد. هزینه سرمایه‌گذاری سامانه‌های چند مرحله‌ای بالاتر است و بسته به پیکربندی آنها، ممکن است از نظر بهره‌برداری، پیچیده‌تر باشند.

- **حذف مواد آلاینده:** بسته به نوع سیستم جمع‌آوری پسماند شهرداری، مقدار مواد آلاینده تجزیه‌ناپذیر زیستی در پسماندهای غذایی و مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ تغییر می‌کند. گاهی اوقات درصد مواد تجزیه‌ناپذیر به عنوان مواد آلاینده به ۱۵ تا ۲۵٪ می‌رسد. بنابراین، طراحی فناوری‌های هضم بیهوازی که برای پردازش مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ انتخاب می‌شوند باید به گونه‌ای باشد که هم کیفیت متوسط و هم طیف گسترده‌ای از کیفیت مورد انتظار خوراک را پردازش کند.

پیش‌پردازش مواد آلی شامل حذف مواد آلاینده پیش از ارسال خوراک یا دوغاب سرشار از مواد آلی برای پردازش بیشتر، در صورت نیاز، و سپس هضم بیهوازی است. فناوری‌های پیش‌پردازشی که منجر به کاهش مواد آلاینده در دوغاب مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ می‌شود شامل پیش‌خردکن، سرند، پرس اکستروژن[4] یا خمیرکننده هیدرولیکی[5] می‌شوند. بسته به ویژگی‌های مواد آلاینده و نوع فناوری هاضم مورد استفاده، فناوری پیش‌پردازش انتخاب می‌گردد. در صورت نیاز، با استفاده از تجهیزات پیش‌پردازش مکمل می‌توان خوراک آلی را قبل از فرایند هضم، بیشتر تصفیه کرد. حذف مواد آلاینده باقیمانده، تغییر مقدار TS یا خرد کردن ممکن است مراحل دیگر پیش‌پردازش باشند.

حذف مواد آلاینده پیش از فرایند هضم از جنبه تعمیر و نگهداری کلی هاضم بسیار مهم است، زیرا پلاستیک‌ها و سایر مواد آلاینده سبک به مرور زمان روی سطح هاضم جمع شده و یک لایه سطحی ضخیم و سخت تشکیل می‌دهند که کارکرد هاضم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین ترتیب، انباشت سنگریزه‌ها و

[1] Self-cleaning
[2] Surface Skimmer
[3] Bottom Scraper
[4] Extrusion Press
[5] Hydraulic Pulper

مواد آلاینده سنگین باعث تشکیل یک لایه جامد در کف هاضم می‌شود و در نتیجه، سرعت سایش پمپ‌ها، شـیرها، لوله‌کشـی و همزن‌ها افزایش می‌یابد. توجه به راهکارهای حذف مواد آلاینده در فاز طراحی، بخش مهمی از برنامه‌ریزی پروژه می‌باشد.

- **مدیریت آب فرایند (تصفیه در محل در مقابل تخلیه):** تولید فاضلاب در فرایند هضم بیهوازی بستگی به انتخاب فناوری هضم بیهوازی و به صورت خاص بستگی به برنامه مدیریت مواد هضم‌شده، محتوای TS و نسبت کربن به نیتروژن (C:N) هاضم‌ها دارد. در بسیاری از موارد، مواد هضم‌شده را می‌توان بدون فرآوری اضافی در زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار داد. اگر طراحی تأسیسات هضم بیهوازی منجر به تولید جریان فاضلاب شود، در آن صورت می‌توان فاضلاب تولیدشده را در خود سایت با نصب واحد تصفیه فاضلاب، پالایش کرد. به عنوان جایگزین، چنانچه فاضلاب تولیدشده مطابق با حدود مجاز آیین‌نامه‌های محلی باشد می‌توان آن را به مجاری فاضلاب بهداشتی تخلیه کرد. ممکن است در مواردی تخطی از حدود مجاز ذکرشده در آیین‌نامه‌های محلی با جریمه‌هایی همراه باشد، بدین معنی که اگر واحدی از حدود مجاز تعیین‌شده در آیین‌نامه‌های محلی برای تخلیه فاضلاب تخطی کند، محکوم به پرداخت جریمه برای تخلیه اضافی خواهد شد.

تصفیه فاضلاب در داخل سایت باید با هدف به حداقل رساندن استفاده از آب آشامیدنی که از منابع شهری خریداری می‌شود باشد. تصفیه به روش حذف بیولوژیکی مواد مغذی (BNR)[1] یک نام کلی برای نوعی از فرایند تصفیه بیولوژیکی هوازی است که می‌تواند به حذف نیتروژن و یا فسفر اشاره داشته باشد. در تأسیسات هضم بیهوازی، فرایندهای BNR معمولاً برای حذف نیتروژن استفاده می‌شوند و برای حذف فسفر معمولاً از روش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. در فرایند هضم بیهوازی، نیتروژن نه تولید شده و نه از بین می‌رود، بلکه بخش زیادی از نیتروژن موجود در خوراک به آمونیاک (NH_3) و آمونیم (NH_4) تبدیل می‌شود.

از نظر فنی، تصفیه به روش BNR بعد از سانتریفیوژ کردن مواد هضم‌شده امکان‌پذیر است و تمامی اشکال این روش مستلزم حجم بالایی از پردازش است و پیچیدگی‌هایی را به بهره‌برداری سامانه هضم بیهوازی خواهد افزود.

- **کنترل و مدیریت بو:** برای آنکه محیط کار ایمنی برای کارگران فراهم شود، از اثرات نامطلوب بو بر محیط خارج از سایت جلوگیری شود و الزامات مربوط به مجوزهای محیط زیستی رعایت شوند باید سیستم‌های کنترل و مدیریت بو باید به تأسیسات هضم بیهوازی اضافه گردد.
- **تجهیزات بهسازی بیوگاز[2]:** برای تولید RNG و تزریق آن به خط لوله گاز محلی نیاز به تجهیزات بهسازی بیوگاز است. RNG تولیدشده را می‌توان انتقال داد، ذخیره کرد و در نهایت به عنوان سوخت وسایل نقلیه یا موتور استفاده کرد. فرایند بهسازی بیوگاز برای حذف حجم زیادی از دی‌اکسید کربن (CO_2) که به طور طبیعی همراه با متان تولید می‌شود لازم است. در فرایند بهسازی همچنین لازم است سولفید هیدروژن (H_2S) و گازهای نامطلوب دیگر مانند عناصر آلی فرار (VOC)[3] از بیوگاز حذف شوند. از نوع خفیف بهسازی بیوگاز، که شامل حذف سولفید هیدروژن است، می‌توان برای پاکسازی نسبی یا همان شیرین‌سازی بیوگاز قبل از سوزاندن آن در دیگ بخار یا موتور گازسوز استفاده کرد.

[1] Biological Nutrient Removal (BNR)
[2] Biogas Upgrading Equipment
[3] Volatile Organic Compound (VOC)

میزان بازیابی RNG از بیوگاز بستگی به انتخاب رشته فناوری‌های مناسب برای تصفیه و نحوه ترکیب آنها در سیستم بهسازی کلی بیوگاز دارد. معمولاً راندمان بازیابی متان در هر یک از مراحل فرایند بهسازی به تنهایی بین ۹۶ تا ۹۹ درصد است. راندمان کلی سیستم که شامل چندین فرایند متوالی است، معمولاً بین ۹۰ تا ۹۵ درصد متان تولیدی است. درصد نهایی متان در RNG برای تزریق به خط لوله گاز بستگی به مشخصاتی دارد که توسط شرکت گاز محلی تعیین می‌شود.

باید در نظر داشت که معیارهای تزریق RNG، بر اساس ظرفیت و دبی جریان در خطوط لوله توزیع گاز و توسط شرکت گاز محلی تعیین می‌شود. متقابلاً برخی از شرکت‌های گاز صرفنظر از ظرفیت و دبی جریان خطوط توزیع گاز، الزامات تزریق RNG را تغییر نمی‌دهند.

با توجه به ترتیب فرایندهای مختلف، سیستم‌های بهسازی بیوگاز برای تولید RNG بسته به فناوری‌های انتخاب‌شده ممکن است از زیرسیستم‌ها و کارکردهای زیر تشکیل شوند:

- فشرده‌سازی اولیه بیوگاز خام.
- گوگردزدایی برای حذف سولفید هیدروژن (H_2S). بسته به دبی جریان و غلظت سولفید هیدروژن ورودی، گوگردزدایی ممکن است غلیظ یا رقیق باشد.
- آب‌زدایی برای حذف رطوبت.
- پیش‌تصفیه برای حذف ترکیبات آلی غیر از متان، هالیدهای آلی و حذف سیلوکسان.
- فشرده‌سازی میانی گاز پیش‌تصفیه‌شده.
- حذف دی اکسید کربن (CO_2).
- حذف نیتروژن (N_2) و یا حذف اکسیژن.
- فشرده‌سازی نهایی RNG.
- مشعل ایمنی (فلر)[1]؛ اگر به دلیل مشکل کیفیت یا محدودیت‌های جریان، امکان تزریق بیوگاز و RNG به خطوط لوله گاز وجود نداشته باشد، در آن صورت بیوگاز و RNG باید به عنوان گاز مازاد در مشعل گازسوز (که به آن مشعل ایمنی یا فلر هم گفته می‌شود) سوزانده شود.
- تصفیه گازهای خروجی[2]؛ گازهای خروجی حاصل از فرایند بهسازی RNG ممکن است شامل دی اکسید کربن با رده‌ای از گازهای مازاد مانند سولفید هیدروژن یا گازهای دیگر باشد. ممکن است لازم باشد پیش از رها شدن گازهای خروجی به جو تصفیه بیشتری- به عنوان مثال از طریق یک اکسیدکننده حرارتی- روی این گازها انجام شود.
- ذخیره‌سازی؛ بسته به طراحی کل سیستم، ممکن است بیوگاز خام یا بهسازی‌شده یا RNG نهایی ذخیره‌سازی شود.

برای حذف دی اکسید کربن از بیوگاز روش‌های مختلفی وجود دارد. به کمک فناوری‌های حذف CO_2، دی اکسید کربن از بیوگاز جدا می‌شود؛ در نهایت، دی اکسید کربن به عنوان گاز مازاد[3] در جو رها می‌شود. رایج‌ترین فناوری‌های حذف دی اکسید کربن شامل موارد زیر است:

[1] Flare

[2] گازی که در اثر کاهش فشار از میعانات گازی جدا می‌شود را off gas می‌گویند. گاز تولیدی از یک واکنش شیمیایی مخصوصاً گازی که مطلوب نیست (به عنوان عوارض جانبی).

[3] Tail Gas

- **شستشو با آب:** اساس فرایند شستشو با آب، حلالیت بیشتر دی اکسید کربن (CO_2) از متان (CH_4) در آب است. این حلالیت بالا در مورد سولفید هیدروژن (H_2S) هم صادق است، این بدین معناست که ممکن است با استفاده از واحد شستشو با آب، نیاز به گوگردزدایی قبل از فرایند بهسازی برطرف شود. در این فرایند، دی اکسید کربن تحت فشار بالا در آب حل می‌شود. در پایین دست، فشار برداشته می‌شود و دی اکسید کربن پیش از بازچرخانی آب، به جو تخلیه می‌شود.
- **شستشوی شیمیایی:** مشابه شستشوی با اب است، با این تفاوت که به جای آب، از مواد شستشوی شیمیایی مانند محلول‌های آمینی آبی[1] یا حلال‌هایی از ترکیبات پلی‌اتیلن گلیکول[2] به عنوان سیال شستشو استفاده می‌شود.
- **جذب با تناوب فشار[3]:** فرآیندی است که در آن، یک گاز از مخلوطی از گازها بر اساس روش تناوب فشار جدا می‌شود. روش PSA مبتنی بر جذب سطحی دی اکسید کربن در یک محیط جامد تحت فشار بالاست. مواد جاذب متداول، کربن فعال و زئولیت‌های طبیعی و مصنوعی هستند. در این سیستم‌ها دی اکسید کربن (CO_2)، سولفید هیدروژن (H_2S) و آب بر اساس خواص فیزیکی جدا می‌شوند؛ مواد جاذب را می‌توان ترکیب کرد یا بر اساس ترکیبات مختلف بیوگاز سفارشی ساخت. مواد جاذب با کاهش متوالی فشار بازتولید می‌شوند که در نتیجه آن، دی اکسید کربن جذب‌شده پیش از بارگیری مجدد ستون در فشار بالاتر، آزاد شده و در جو تخلیه می‌شود.
- **جداسازی غشایی:** این روش بر اساس اصل نفوذ محلول در یک غشاء نامتخلخل کار می‌کند و برای جداسازی دی اکسید کربن استفاده می‌شود. غشاء منفذی ندارد و به همین دلیل، جداسازی بر اساس اندازه مولکولی نیست. اساس جداسازی در این روش، میزان حلالیت ترکیبات مختلف در غشاء و سرعت نفوذ آنها در غشاء است.

- **طراحی سیستم پایش و کنترل:** در تأسیسات هضم بیهوازی سیستم کنترل این امکان را فراهم می‌کند تا توالی کارها[4] از جمله کارکردهای ایمنی به درستی انجام شود. معمولاً در مورد فلسفه و معماری سیستم کنترل در مراحل اولیه تعریف پروژه تصمیم‌گیری می‌شود. روش‌های کنترل تجهیزات، به عنوان مثال یک پمپ، ممکن است شامل کنترل‌های موضعی روی تجهیز [روی پمپ]، کنترل دستی در یک مرکز کنترل [مرکز کنترل موتوری] و حالت کنترل خودکار باشد تا تجهیز [پمپ] مطابق با منطق کنترلی برنامه‌پذیر کار کند. کنترل‌گر منطقی برنامه‌پذیر[5] معمولاً با یک کامپیوتر کنترل سرپرستی و گردآوری داده[6] رابط کاربری دارد.

کامپیوتر نظارت و سرپرستی اغلب یک صفحه نمایش از کل سیستم و یک رابط کاربری در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا تجهیزات را مشاهده و کنترل نماید. سیستم‌ها به صورت خودکار از طریق اجرای توالی برنامه‌نویسی شده کارها در PLC کنترل می‌شوند. در صورت نیاز می‌توان سیستم را به حالت کنترل دستی تغییر داد که معمولاً این اتفاق در زمان راه‌اندازی یا عیب‌یابی رخ می‌دهد. توالی کارها در سیستم کنترل

[1] Aqueous Amine Solutions
[2] Polyethylene Glycol Solvent
[3] Pressure Swing Adsorption (PSA)
[4] Sequence of Operations
[5] Programmable Logic Controller (PLC)
[6] Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)

توسط طراح تهیه می‌شود و توسط پیمانکار یا ارائه‌دهنده فناوری پیاده‌سازی می‌شود. در اغلب موارد، پیمانکار بخش برق، سیستم کنترل را نیز فراهم می‌کند.

- **مشاغل فنی[1] و خدمات:** حفظ افراد حرفه‌ای که دارای تخصص فنی هستند و در زمینه آموزش خود دارای مجوز، دارای صلاحیت، دارای اعتبار و موثق می‌باشند حائز اهمیت است. کارهای فنی خاص که در تأسیسات هضم بیهوازی مورد نیاز خواهند بود عباتند از:

- **کار تأسیسات لوله‌کشی:** در اغلب موارد، لوله‌هایی که ساختمان‌ها و بخش‌های فرایندی را به یکدیگر مرتبط می‌کنند برای به حداقل رساندن تعداد تکیه‌گاه‌های لوله، در زیر زمین نصب می‌شوند. برای حفظ ایمنی و آسایش بهره‌برداران تأسیسات هضم بیهوازی و کسانی که به هر دلیلی وارد تأسیسات می‌شوند، اطمینان از اینکه لوله‌کشی بر اساس ترافیک وسائل نقلیه و کارکرد عملیاتی طراحی شده است، حائز اهمیت است.
- **کار تأسیسات مکانیکی:** کارهای تأسیسات مکانیکی شامل سیستم گرمایشی، همزن‌ها، پمپ‌ها، شیرآلات و تهویه است. کارهای تأسیسات مکانیکی غالباً پیچیده‌ترین بخش یک تأسیسات هضم بیهوازی بشمار می‌آید. سیستم‌های مکانیکی باید طبق طراحی، از جمله طراحی واشرها و سخت‌افزارهای مناسب، تکمیل شوند.
- **شغل تأسیسات برقی:** پس از اتمام نصب کلیه تجهیزات توسط مشاغل دیگر، پیمانکار بخش برق، برق مورد نیاز کلیه بخش‌های تأسیسات هضم بیهوازی را تأمین می‌کند. کارهای تأسیسات برقی شامل نصب تجهیزات قطع محلی موتورها، همچنین در صورت نیاز، نصب تجهیزات حفاظتی مناسب از سیم‌ها و تجهیزات ضدانفجار باید تکمیل شوند.

[1] Trades

۱۵- فصل پانزدهم : راه‌اندازی و آغاز به کار تأسیسات هضم بیهوازی

۱۵-۱- مقدمه

به منظور آماده شدن برای "راه‌اندازی"[1] و "آغاز به کار"[2] تأسیسات هضم بیهوازی، لازم است برنامه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری از تأسیسات، تکمیل و از پیش، با پرسنل راه‌اندازی و بهره‌برداری مورد بررسی قرار گیرد. با انجام این پیش‌برنامه‌ریزی اطمینان خاطر حاصل خواهد شد که رویه‌های بهره‌برداری، پایش و کالیبراسیون تجهیزات و تعمیرات و نگهداری تأسیسات به درستی درک شده و در خلال راه‌اندازی و آغاز به کار تأسیسات رعایت می‌شوند.
به محض اینکه تأسیسات شروع به پذیرش خوراک می‌کند، احتمال ایجاد بو، سر و صدا و حضور حشرات موذی و ناقل بیماری وجود دارد. تأسیسات هضم بیهوازی از این حیث منحصر بفرد است که به محض شروع فرایندهای بیولوژیکی، این فرایندها باید پیوسته حفظ شوند و خوراک باید به طور منظم در طول دوره راه‌اندازی و آغاز به کار تأسیسات تأمین شود. در زمانی که تأسیسات هنوز وارد فاز بهره‌برداری کامل نشده است لازم است مراحل عملیاتی کلیدی خاصی قبل از آغاز به کار تأسیسات انجام شوند تا اطمینان حاصل شود کنترل بو و حشرات موذی بعد از رسیدن تأسیسات به ظرفیت تولید اسمی تعیین‌شده، تحت کنترل خواهد بود.
تأسیسات هضم بیهوازی همانند یک موجود زنده است و دوره آغاز به کار از این جهت بسیار حائز اهمیت است که شرایط بیولوژیکی سالم برای بهبود تجزیه زیستی پایدار و تولید بیوگاز پایدار را فراهم می‌کند.
فرایند آغاز به کار اغلب در چندین مرحله انجام می‌شود که عبارتند از:

- انجام تست آب آشامیدنی و تست نشتی پمپ‌ها، مخازن و تجهیزات.
- کالیبراسیون و تنظیم کلیه سیستم‌های کنترل و ابزار دقیق.
- پر کردن هاضم(های) بیهوازی و مخازن پذیرش[3] طبق دستورالعمل‌های طراح.
- افزایش فرایند گرمایش و رساندن فرایند به دمای طراحی.
- برای آغاز به کار بیولوژیکی لازم است تا رسیدن به شرایط کاری حال پایا[4]، عملیات باروری و تغذیه هاضم ادامه یابد.
- اگر از فیلتر زیستی برای کنترل بو، از فرایندهای بیولوژیکی برای حذف گوگرد یا از سیستم‌های بیولوژیکی برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود، در آن صورت برای اطمینان از زنده ماندن میکروارگانیسم‌ها در این سیستم‌ها و حفظ اثربخشی آنها، کارکرد پیوسته این فرایندهای زنده باید حفظ شود.

مرحله "آغاز به کار" تأسیسات هضم بیهوازی زمانی به اتمام می‌رسد که ظرفیت پردازش خوراک در تأسیسات به حالت پایا برسد و تمام شاخص‌های کلیدی فرایند و مواد نهایی خروجی از مشخصات کیفی مناسبی برخوردار باشند.
ممکن است برای شروع فرایند هضم بیهوازی در تأسیسات هضم بیهوازی لازم باشد فرایند باروری یا تلقیح مواد هضم‌شده با مقدار زیادی باکتری بیهوازی انجام شود. شروع تا خاتمه فرایندهای بیولوژیکی، بدون استفاده از برنامه باروری‌سازی فعال، ممکن است ۴ تا ۱۲ ماه بطول بینجامد. ضرورتی ندارد بارگیری یک هاضم جدید با استفاده از

[1] Commissioning
[2] Start-up
[3] Reception Tank
[4] Steady-State Operational Conditions

مواد بارورکننده یک هاضم موجود صورت بگیرد، هر چند انجام این کار می‌تواند زمان آغاز به کار را تا حد زیادی کاهش دهد.

باید توجه داشت که در تأسیسات هضم بیهوازی نصب‌شده در مزارع، نیازی به ماده تلقیح (باروری خارجی) نیست. فضولات دامی اغلب حاوی باکتری‌های کافی برای شروع فرایند است. پس از آنکه هاضم تا حدی که برای همزدن، گرم کردن و تلقیح مناسب باشد پر شد امکان پذیرش خوراک اضافی وجود دارد.

توصیه می‌شود در دوره آغاز به کار عجله‌ای برای ذخیره‌سازی خوراک صورات نگیرد، زیرا هنگام ذخیره‌سازی احتمال فاسدشدن خوراک و ایجاد بوی نامطبوع وجود دارد. به محض آنکه مخازن هضم بیهوازی به حد کافی برای همزدن و گرم شدن، پر شدند دمای فرایند در داخل راکتورها باید به تدریج افزایش یابد. البته تا زمان رسیدن به دمای کاری، مقدار افزایش دما نباید بیشتر از یک درجه سانتی‌گراد در روز باشد. گرمایش با نرخ بالاتر باعث وارد شدن شوک به باکتری‌ها می‌شود. وقتی که دمای داخل هاضم به دمای هدف حالت پایا برسد، تولید بیوگاز در تأسیسات هضم بیهوازی باید آغاز شود.

وقتی دما در تأسیسات هضم بیهوازی به دمای حالت پایا برسد از نظر شیمی، شرایط کاری در داخل هاضم به پایداری رسیده است و بیوگاز با حداقل ۵۰ درصد متان تولید می‌شود و اپراتور می‌تواند خوراک بیشتری به هاضم اضافه کند. اضافه کردن خوراک باید به شیوه‌ای انجام شود که باکتری‌ها امکان این را داشته باشند که خود را با شرایط جدید وفق داده و سازگار کنند. ناتوانی در انجام این کار می‌تواند منجر به راه‌اندازی یا بهره‌برداری کُند یا بعضاً ناموفق شود.

اگر در تأسیسات هضم بیهوازی از روش هضم همزمان[1] چند خوراک استفاده می‌شود یا از خوراکی با تنوع در ترکیب برای فرایند هضم استفاده می‌شود باید اطمینان حاصل شود که این خوراک‌های متنوع، همساز هستند و برای پشتیبانی از بیولوژی هضم، از نظر مواد مغذی متوازن هستند. در این مرحله برای ارائه رهنمود و پشتیبانی میکروبیولوژیکی ممکن است نیاز به مشاوره با یک طراح فرایند یا یک متخصص فنی باشد.

در هنگام آغاز به کار تأسیسات هضم بیهوازی، اپراتور باید برنامه‌ای برای ثبت سوابق رخدادهای بیشتر از حد معمول کارکرد نیروگاه داشته باشد و نحوه پاسخ سامانه هضم بیهوازی به خوراک‌های مختلف را ثبت نماید. اصلی‌ترین ابزار برای پایش کارکرد هاضم بیهوازی عبارتند از: ۱) pH متر؛ ۲) دستگاه آنالیز تیتراسیون- که ممکن است دستی یا نیمه‌خودکار باشد؛ و ۳) دستگاه تست کیفیت بیوگاز.

[1] Co-digestion

۱۶- فصل شانزدهم : بهره‌برداری از تأسیسات هضم بیهوازی

۱۶-۱- مقدمه

کارکرد تأسیسات هضم بیهوازی بر اساس انواع خوراک آلی که به هاضم تغذیه می‌شود، محیطی که برای باکتری‌های بیهوازی فراهم می‌شود و خروجی‌های مورد انتظار- مانند کاربرد نهایی بیوگاز و مواد هضم‌شده تولیدی- تعیین خواهد شد. در این بخش از دستورالعمل، مروری اجمالی بر فرایند هضم بیهوازی ارائه شده و به طور کلی، گزینه‌های فناوری و بهترین شیوه‌های مدیریتی برای هر یک از واحدهای عملیاتی که ممکن است در تأسیسات هضم بیهوازی مورد استفاده قرار گیرد، تشریح می‌گردد.

۱۶-۲- ملاحظات کارکردی نیروگاه هضم بیهوازی

در زمان بهره‌برداری از تأسیسات هضم بیهوازی چندین فاکتور باید در نظر گرفته شود. فرایندهای باکتریایی، قلب یک تأسیسات هضم بیهوازی است و شرایط باید در داخل مخازن هضم بیهوازی تثبیت شود تا منجر به حفظ و ارتقاء سلامت و رشد باکتری‌های بیهوازی مورد نظر گردد.

۱۶-۳- مدیریت و پساپردازش مواد هضم‌شده

پس از آن که خوراک برای تولید بیوگاز تحت فرایند هضم بیهوازی قرار گرفت، ماده‌ای باقی خواهد ماند که به آن ماده هضم‌شده گفته می‌شود. ماده هضم‌شده همچنان کمابیش حاوی تمام ریزمغذی‌ها و درشت‌مغذی‌هایی است که در خوراک اولیه وجود داشتند. در تأسیسات هضم بیهوازی تر، ماده هضم‌شده یک مایع آلی با درصد مواد جامد کم خواهد بود.
ماده هضم‌شده سرشار از مواد مغذی همانند کود یا تقویت‌کننده خاک ارزشمند است. مدیریت مواد هضم‌شده یک جنبه اساسی در برنامه‌ریزی پروژه به ویژه در مناطقی است که با پیامدهای اضافه ظرفیت[1] مواد مغذی مواجه هستند.

۱۶-۴- استفاده از بیوگاز

بیشتر تأسیسات هضم بیهوازی برای تولید بیوگاز طراحی می‌شوند و فروش انرژی تولیدشده از بیوگاز خام معمولاً عامل اصلی ساخت تأسیسات هضم بیهوازی است. بعضی از سامانه‌های هضم بیهوازی پسماند شهری در ابتدا به

[1] Overloading

عنوان تأسیسات پردازش بخش فسادپذیر پسماند خانگی تفکیک‌شده از مبدأ در نظر گرفته می‌شدند و بیوگاز به سادگی در فلر سوزانده می‌شد که این روش دیگر توصیه نمی‌شود.

به طور کلی، بیوگاز خام ترکیبی از ۵۰ تا ۶۵ درصد متان، ۴۰ تا ۵۰ درصد دی اکسید کربن و ترکیبی از سایر گازهای سازنده با نسبت‌های کمتر از جمله سولفید هیدروژن، بخار آب، نیتروژن و اکسیژن است. گازهای آلاینده اضافی مانند ترپن‌ها[1]، VOCها و سیلوکسان‌ها[2] به عنوان گازهای کمیاب قابل شناسایی هستند. کاربردهای رایج انرژی برای بیوگاز عبارتند از:

- تولید برق، از طریق سوزاندن بیوگاز در موتورهای احتراق داخلی که مخصوص این کار طراحی شده‌اند و به ژنراتورهای الکتریکی بزرگ متصل می‌شوند. این واحدها به عنوان مولدهای تولید همزمان برق و حرارت (CHP) شناخته می‌شوند، زیرا این مولدها انرژی حرارتی (یعنی گرما) را به عنوان محصول جانبی تولید می‌کنند.
- تولید گاز طبیعی با درجه خلوص قابل تزریق به خط لوله گاز- از طریق شستشوی بیوگاز خام به منظور حذف ناخالصی‌ها برای دستیابی به متان تقریباً خالص- که معمولاً به عنوان گاز طبیعی تجدیدپذیر (RNG) یا متان زیستی (بیومتان) شناخته می‌شود. RNG را می‌توان به طور مستقیم به شبکه گاز طبیعی تزریق کرد یا برای سوخت‌رسانی به ناوگان CNG مورد استفاده قرار داد.
- مصرف بیوگاز به صورت مستقیم به عنوان سوخت در دیگ‌های بخاری که مخصوص مصرف بیوگاز طراحی شده یا دیگ‌های بخار دوگانه‌سوزی که قادر به کار با سوخت بیوگاز هم باشند (یعنی کاربردهای ایستا).

به طور کلی، انتقال بیوگاز خام در فواصل طولانی به هیچ وجه اقتصادی نیست. بنابراین، تجهیزات مورد نیاز برای تولید انرژی از بیوگاز باید در همان سایت یا در همسایگی نزدیک به تأسیسات استقرار یابند. تولید انرژی به صورت محلی مستلزم در دسترس بودن بازار انرژی به موقعیت تولید است. دسترسی به بازار انرژی یا از طریق دسترسی به خط لوله گاز یا از طریق دسترسی به خطوط انتقال و توزیع برق با ولتاژ بالا امکانپذیر است. دسترسی به بازار انرژی یکی از ملاحظات کلیدی در انتخاب و قطعیت سایت برای انجام پروژه‌های هضم بیهوازی است.

توسعه‌دهنده احتمالی پروژه هضم بیهوازی باید مستقیماً با شرکت‌های خدمات‌رسانی همگانی محلی مرتبط (شرکت گاز یا شرکت برق) رایزنی کند تا اطمینان حاصل شود که زیرساخت‌های محلی موجود، ظرفیت کافی برای دریافت انرژی تولیدی به صورت شبانه‌روزی (۲۴ ساعت/۷ شبانه‌روز) و در طول سال را دارد. وجود تأسیسات محلی الزاماً به معنی ظرفیت کافی در طول سال نیست.

صرفنظر از مسیر انرژی انتخاب‌شده، هیچ گاه مطابقت کاملی میان بیوگاز خروجی از تأسیسات هضم بیهوازی و قابلیت مسیر انرژی انتخاب‌شده برای بهره‌گیری ساعت به ساعت و روز به روز از آن، وجود نخواهد داشت. به عنوان مثال، بروز یک اختلال کوچک در شبکه برق در هنگام رخداد صاعقه می‌تواند باعث قطع سیستم تولید توان هاضم از شبکه برق تا زمان راه‌اندازی مجدد آن شود. به همین ترتیب، انجام عملیات تعمیرات و نگهداری در خطوط لوله انتقال گاز می‌تواند باعث شود شرکت گاز تا اتمام عملیات، قادر به پذیرش RNG تولیدشده نباشد. بروز چنین اختلالاتی در شبکه انرژی ممکن است از چند دقیقه تا چند روز بطول بینجامد.

[1] Terpene
[2] Siloxane

معمولاً در طراحی تأسیسات هضم بیهوازی، ذخیره‌سازی بیوگاز در نظر گرفته می‌شود تا تغییرات نرخ تولید بیوگاز را دفع کرده و تغذیه سیستم تبدیل انرژی به طور ثابت انجام شود. در صورتی که شبکه انرژی در دسترس نباشد، بیوگاز اغلب در فلز سوزانده می‌شود.

۱۶-۵- مدیریت مواد باقیمانده غیرآلی

اگر تأسیسات هضم بیهوازی خوراکی دریافت می‌کند که با بسته‌بندی مواد غذایی و مواد غیرآلی دیگر مانند پلاستیک، شیشه، سرامیک و مواد دیگر مخلوط است در آن صورت، باید دارای تجهیزات ویژه‌ای برای جدا کردن این گونه مواد از بخش آلی قابل هضم باشد. از آنجایی که بسیاری از خوراک‌ها می‌توانند حاوی باکتری‌های بیماری‌زا مانند E.coli، سالمونلا[1] یا پاتوژن‌های انسانی دیگر باشند که منشأ آنها پوشک‌های مستعمل و پوشینه دفعیات غیرارادی مصرف‌شده یا محصولات بهداشتی مصرف‌شده است، برای اطمینان از ایمنی و سلامت اپراتورها هنگام انجام تعمیرات و نگهداری در هر قسمت از سامانه هضم یا تجهیزات، احتیاط زیادی لازم است.
جدا کردن مواد غیرقابل هضم از خوراک، جریان پیوسته‌ای از مواد غیرآلی به وجود خواهد آورد که باید به عنوان بخشی از این عملیات مدیریت، ذخیره‌سازی و در نهایت، دفع شود. معمولاً مواد غیرآلی باقیمانده همچنان حاوی آب و حداقل مقادیر کمی مواد آلی هستند که به این مواد چسبیده و مستعد تولید بو هستند. تمام جنبه‌های مدیریت، ذخیره‌سازی و دفع پسماندهای غیرآلی باید در برنامه مدیریت بوی تأسیسات گنجانده شود. محل انبارش این مواد در تأسیسات باید به قدر کافی بزرگ باشد تا امکان حمل و نقل برای دفع پسماندهای غیرآلی به شکل مؤثری تسهیل شود، در عین حال باقیمانده این مواد در محل انبارش بقدر کافی کم باشد که نیاز به مدیریت بو را به حداقل برساند. تا به امروز، تجارب برخی از کشورها برای بازیابی مواد قابل بازیافت یا مواد باارزش دیگر از جریان مواد آلاینده غیرآلی موفقیت‌آمیز نبوده و در نتیجه، این مواد در حالت کلی برای دفع، به مراکز دفن منتقل می‌شوند.

۱۶-۶- پیشگیری از موقعیت‌های اضطراری

اپراتورهای سایت باید طرح‌های اقتضایی[2] مفصلی برای شناسایی، پیشگیری و مواجهه با موقعیت‌های غیرمعمول و اضطراری در تأسیسات هضم بیهوازی، تهیه و نگهداری کنند. به عنوان مثال، این طرح‌ها می‌تواند مواردی از جمله رواناب خروجی از محل نگهداری خوراک حاصل از بارندگی، سر و صدا، گرد و خاک، پسماند، شکایت از بو، آتش‌سوزی، قطعی برق، موارد اضطراری و نشت یا تخلیه گاز، مانند متان و سولفید هیدروژن، را تحت پوشش قرار دهد.

[1] Salmonella
[2] طرحی به منظور برآورده کردن نیازهای مشتری در شرایط وقوع حوادث اضطراری مانند وقفه در تأسیسات، کمبود نیروی انسانی و و غیره (Contingency Plan)

استفاده از سیستم پشتیبان برای تأمین برق واحدهای عملیاتی مهم و تأسیسات کنترل بو در مواقع قطع مولد CHP یا سیستم تأمین برق اصلی، غیرمعمول نیست. به همین ترتیب، ممکن است طراح تأسیسات برای نگهداشت گرمای کاری هاضم در مواقع قطع مولد CHP یا سیستم تأمین گرمایش اصلی، دیگ بخار پروپان‌سوز یا گازسوز در نظر بگیرد.
برخی از طرح‌های اقتضایی به واسطه مقررات و مجوزهای محیط زیستی مورد نیاز است، در حالی که برخی دیگر به واسطه مقررات ایمنی و سلامت شغلی مورد نیاز هستند و برخی دیگر، اقدامات خوب مدیریتی در تأسیسات هضم بیهوازی هستند. اپراتورها باید مقررات محلی خود را از نظر نوع طرح‌های اقتضایی مورد نیاز بررسی کنند. یک نسخه از طرح‌های اقتضایی باید در محل سایت نگهداری شده و کلیه کارکنان بهره‌برداری در ارتباط با محتوای این طرح‌ها آموزش ببینند؛ مستندسازی این آموزش‌ها باید به صورت مکتوب انجام شده و برنامه‌ای برای حفظ و نگهداری سوابق تهیه شود. معمولاً به محض بروز مشکل، طرح اقتضایی باید اجرا شود.
پیشنهاد می‌شود در تأسیسات کوچک، هنگامی که افراد کمی در بخش‌های مختلف تأسیسات مشغول به کار هستند، با بکارگیری سیستم پایش کارگران تنها[1] تدابیر امنیتی بیشتری اتخاذ شود.

۱۶-۷- تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه و قطعات یدکی

برای اطمینان از این که تأسیسات هضم بیهوازی به طرز مؤثر و ایمن به کار خود ادامه می‌دهد، به یک برنامه منسجم برای تعمیرات و نگهداری و تأمین قطعات یدکی احتیاج است. تعدادی از قطعات یدکی از جمله انواع خاصی از پمپ‌ها، همزن‌ها، تجهیزات حذف مواد آلاینده و سیستم‌های کنترل بو یا سیستم‌های محیط زیستی، برای کارکرد تأسیسات، حیاتی هستند.
تأمین قطعات یدکی هم برای وقفه‌های برنامه‌ریزی‌شده و هم برای وقفه‌های برنامه‌ریزی‌نشده می‌تواند پرخرج بوده و زمان انتظار طولانی داشته باشد. مدیریت تأسیسات می‌تواند هزینه نگهداری قطعات یدکی در موجودی انبار و ریسک و پیامدهای یک وقفه برنامه‌ریزی‌نشده را محاسبه نماید.
منبع، موقعیت مکانی و قابلیت اطمینان در تأمین قطعات یدکی معیارهای هستند که در انتخاب یک تأمین‌کننده تجهیزات یا فناوری، در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری از موارد، وقتی پیامدهای توقف تولید و ریسک انتشار بو در مدت زمانی که طول می‌کشد تا قطعه‌ای ساخته شده و به تأسیسات ارسال شود در نظر گرفته می‌شود، می‌توان هزینه قطعات یدکی حیاتی را توجیه کرد.

۱۶-۸- آموزش اپراتورها

[1] Lone Worker Monitoring

اپراتورهای تأسیسات هضم بیهوازی برای افزایش شناخت خود از کارکردهای فرایندی و کسب تجربه عملی باید به شرکت در دوره‌های آموزشی باکیفیت ترغیب شوند. در دوره‌های آموزشی برای اپراتورهای تازه‌کار، آموزش منابع و ابزاری که آنها برای بهره‌برداری ایمن از تأسیسات هضم بیهوازی نیاز خواهند داشت توصیه می‌شود. به عنوان بخشی از روند توسعه پروژه هضم بیهوازی، شناخت دقیق از فرایندها و سامانه‌های خاص هضم بیهوازی و نیازهای آموزشی کارکنان مرتبط با آن، ضروری است. برنامه آموزشی باید بر مبنای شناخت دقیق نیازهای آموزشی، تدوین شود.

ارائه‌دهندگان خدمات، مشاوران و تأمین‌کننده فناوری هضم بیهوازی می‌توانند آموزش‌های ویژه ساختگاه که به طور اختصاصی برای هر تأسیسات تهیه شده است را ارائه کنند.

منابعی وجود دارد که اپراتورها برای بهره‌برداری ایمن باید در نظر بگیرند. در ادامه فهرست کوتاهی از این منابع که محدود به آنها نمی‌شود، ارائه شده است:

- مبانی فرایند هضم بیهوازی و ایمنی بیولوژیکی
- مدیریت خوراک
- مدیریت ناقلین بیماری، حیوانات موذی و جانوران وحشی دیگر (از جمله خرس‌ها در برخی مناطق)
- ایمنی گاز شامل متان، دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن
- قفل کردن و برچسب گذاری تجهیزات برقدار[1]
- فضای بسته
- کار کردن در ارتفاع
- واکنش اضطراری، شامل کمک‌های اولیه و اطفاء حریق

برای اطمینان از این که آموزش‌های مناسب شناسایی شده و برنامه‌های آموزشی به درستی تدوین شده‌اند لازم است با طراح تأسیسات و متخصصان دیگر مشورت شود.

۱۶-۹- ملاحظات محیط زیستی

برای اطمینان از داشتن یک تأسیسات پاک و ایمن، باید ملاحظات محیط زیستی زیر از دیدگاه کارکردی در نظر گرفته شوند. همچنین، نظافت کارگاهی مناسب و پاکیزه و منظم نگهداشتن سایت، به کاهش نگرانی‌های از انتشار بو کمک می‌کند.

- **زباله:** زباله[2]، در درجه اول به شکل پلاستیک و کاغذ، ممکن است در بار مواد زائد که به عنوان خوراک مورد استفاده قرار می‌گیرد، وجود داشته باشد. مواد سبک وزن ممکن است به وسیله باد از خودروهای حمل خوراک به بیرون پرتاب شده یا به اطراف سایت پخش شوند و در نتیجه، باعث ظاهر ناهنجار و شکایت همسایگان شود. عامل ایجاد زباله در سایت ممکن است پخش شدن مواد پلاستیکی مانند مشمع، از مخازن یا اماکن روباز نگهداری مواد هضم‌شده به بیرون هم باشد. به دلیل حرکت وسایل نقلیه در اطراف سایت و خروج از

[1] Energized equipment lock-out and tag-out

[2] آشغال (به ویژه اگر در محیطی پراکنده باشد) : Litter

تأسیسات، زباله را ممکن است در اطراف و بیرون از سایت هم مشاهده کرد. اقداماتی که سایت به سایت می‌توان برای کاهش زباله در یک تأسیسات انجام داد عبارتند از:

- از پذیرش بار خودروهای بدون پوشش خودداری شود.
- خوراک در یک محیط بسته دریافت و پردازش شود.
- اگر پردازش و غربالگری پسماند آلی در فضای باز به ویژه در روزهای بادی انجام می‌شود، دقت شود.
- زباله‌ها بی‌درنگ در داخل و خارج از سایت جمع‌آوری شود؛ برای این کار می‌توان روزانه از یک وانت استفاده کرد.
- اطمینان حاصل شود که زباله‌ها و بقیه مواد زائد موجود در سایت، در مخازن سربسته مناسبی نگهداری و به طور منظم دفع می‌شوند.

- **گرد و خاک:** گرد و خاک به دلیل تردد در راه‌های شنی و محوطه پارکینگ‌ها تولید می‌شود. تردد کامیون‌ها در مسیرهای آسفالته یا سنگ‌فرش‌شده‌ای که به دلیل خروج وسایل نقلیه از سایت کثیف شده‌اند هم می‌تواند عامل تولید گرد و خاک باشد. اقداماتی که برای کنترل گرد و خاک باید در نظر گرفته شوند عبارتند از:

- روکش‌دار کردن (آسفالت یا سنگ‌فرش) مسیرهای داخل سایت، پارکینگ و اماکن نگهداری کامیون‌ها.
- استفاده از تجهیزات جاروب مسیرهای داخل سایت برای جمع‌آوری منظم گرد و خاک از سایت.
- خیس کردن مسیرهای شنی خشک و گرد و خاکی داخل سایت.
- اطمینان از این که چرخ‌های وسایل نقلیه قبل از خروج از سایت شسته می‌شوند تا اثر گرد و خاک در مسیرهای عمومی خارج از سایت به حداقل برسد.
- رسیدگی منظم به مسیرها، از جمله شن‌ریزی تازه در صورتی که راهکار این باشد.

- **ناقلین بیماری و جانوران موذی:** پسماند آلی در شکل پردازش‌نشده آن و پسماندهای غذایی، انواع مختلف ناقلین بیماری و جانوران موذی از جمله حشرات، جوندگان، پرندگان و جانوران وحشی دیگر را به خود جذب می‌کنند. به محض استقرار تأسیسات هضم بیهوازی، از بین بردن ناقلین بیماری و جانوران موذی می‌تواند بسیار دشوار باشد و ممکن است به یک معضل سلامت عمومی تبدیل شود.

جانوران وحشی ممکن است به دلیل وجود غذا و سرپناه در سایت تأسیسات هضم بیهوازی، جذب آن شوند. مگس‌ها جذب مواد تجزیه‌پذیر می‌شوند و پشه‌ها ممکن است در استخرهای آب موجود در سایت زادآوری کنند. اماکن احتمالی مشکل‌زا در تأسیسات هضم بیهوازی عبارتند از:

- اماکن دریافت و ذخیره‌سازی
- اماکن پردازش، مسیر جریان رواناب سطحی و اماکن پَست و کم‌ارتفاع داخل تأسیسات که محل مهار آب یا مواد ایستا است
- پارکینگ کامیون‌های حمل خوراک و اماکن نگهداری کانتینرهای روباز خالی[1]
- دور و اطراف سایت
- مسیرها

اقداماتی که برای کنترل ناقلین بیماری و جانوران موذی در سایت باید در نظر گرفته شود عبارتند از:

- پسماندها (به ویژه پسماندهای غذایی) بدون فوت وقت به فرایندهای فعال اضافه شود.

[1] Empty Roll-off Bin

- اماکن نگهداری خوراک، داخل ساختمان باشد.
- مدیریت فعال حوضچه‌های روناب و جمع‌آوری آب.
- پاک‌سازی منظم اماکن دریافت.
- در صورت نیاز، استفاده از وسایل کنترل آفات (آفت‌کش‌ها و ...) و تله‌گذاری برای جانوران موذی.
- حصارکشی مناسب سایت به ویژه در سایت‌هایی که امکان دارد جانوران وحشی بزرگتر مانند خرس را به خود جذب کند.

۱۷- فصل هفدهم : پیشگیری، کنترل و مدیریت بو

۱۷-۱- مقدمه

کنترل بو باید در تمامی مراحل برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود. مدیریت بو اغلب یکی از الزامات دریافت مجوز محلی برای بهره‌برداری از تأسیسات هضم بیهوازی است و مدیریت موفق بو برای کارکرد موفق تأسیسات هضم بیهوازی بسیار حائز اهمیت است.

عدم رعایت الزامات مندرج در مجوز ممکن است منجر به اعمال جریمه و در موارد حاد، منجر به تعطیلی تأسیسات شود. علاوه بر این، در صورتی که سیستم‌های مدیریت بو کارایی لازم را نداشته باشند ممکن است به دلیل نشت سولفید هیدروژن یا گازهای خطرناک دیگر، خطر ایمنی ایجاد کنند.

۱۷-۲- منابع تولید بو

هر جنبه از کارکرد تأسیسات هضم بیهوازی پتانسیل تولید بو دارد. برای شناسایی عوامل بالقوه انتشار شدید بو در تأسیسات، در مدل انتشار بو باید منابع زیر در نظر گرفته شوند:

- **میزان تردد در داخل سایت:** کامیون‌هایی که وظیفه تحویل خوراک به تأسیسات و انتقال مواد هضم‌شده به بیرون از سایت را برعهده دارند در هنگام تردد در اطراف نیروگاه و در زمان توقف برای تخلیه بار و بارگیری، ممکن است منجر به تولید بو شوند. نگهداری کامیون‌های و کانتینرهای روباز خالی، در صورتی که کاملاً تمیز نشده باشند، می‌توانند از منابع اصلی تولید بو باشند.
- **بوی ناشی از کار فعال در تأسیسات هضم بیهوازی:** در طول ساعات کاری، بو تولید خواهد شد زیرا هنگامی که خوراک تازه وارد سایت می‌شود، خرد می‌شود، مخلوط می‌شود یا به طریق دیگر مدیریت می‌شود منجر به تولید بو خواهد شد. اگر این کارها در خارج از سایت انجام شوند یا در تأسیساتی انجام شوند که فاقد سیستم کنترل مؤثر بو است، بوی حاصل از فرآوری خوراک منجر به انتشار بو از تأسیسات خواهد شد.

  بو در داخل سایت ممکن است از فرایندهای طبیعی تولید شود که به طور مستقیم مربوط به فرایند هضم بیهوازی نباشد. به عنوان مثال، جمع شدن آب در حوضچه آب باران و تجزیه زیستی طبیعی متعاقب جلبک در آب و هوای گرم می‌تواند عامل تولید بو باشد.

  به همین ترتیب، در مخازن نیمه‌خالی نگهداری خوراک یا مخازن پیش‌پردازش خوراک تا پیش از آن که دوباره با خوراک تازه پر شوند مقدار زیادی هوای بدبو در فضای خالی وجود دارد. با توجه به این که مخزن مواد خام به سرعت توسط یک کامیون حمل خوراک پر می‌شود، در نتیجه هوای بدبو به سرعت به بیرون از مخزن تخلیه می‌شود. اگر این وضعیت در طراحی سیستم کنترل بو به صورت کامل دیده نشده باشد می‌تواند بلافاصله سیستم کنترل بو را از کار بیندازد.

- **بوی ناشی از ذخیره‌سازی پیوسته و پیش‌پردازش مواد:** ذخیره‌سازی و پیش‌پردازش مواد آلی که هنوز به فرایند هضم بیهوازی اضافه نشده‌اند یا ذخیره‌سازی مواد هضم‌شده بعد از پردازش در یک محیط کنترل‌نشده، باعث ایجاد منبع پیوسته تولید بو خواهد شد.
- **فلر:** سوزاندن بیوگاز مازاد در فلر هنگامی صورت می‌گیرد که موتور یا سیستم بهسازی بیوگاز خاموش شده یا بیوگاز اضافی تولید شود. انتشار بو زمانی رخ خواهد داد که فلر به دلیل محصولات احتراق در حال کار باشد.
- **بوهای فرار:** نشت بیوگاز، یک منبع تولید بو است. جلوگیری از نشت بو و استفاده از ساختمان‌ها و مخازن بسته از مهمترین شیوه‌های کاهش انتشار بوی فرار است. ساختمان‌هایی که نامناسب ساخته شده باشند و بسته نگهداشتن درب‌ها در ساختمان‌های ذخیره‌سازی و یا پیش‌پردازش یا پساپردازش خوراک به خوبی و به صورت درزبند قابل انجام نباشد، می‌تواند باعث انتشار بوی فرار شود.
- **نظافت کارگاهی:** انباشته‌شدن و چسبیدن مقادیر اندک از پسماندهای آلی به تجهیزات، دیواره‌ها و کف بخش‌های مختلف داخل تأسیسات هضم بیهوازی هنگام مدیریت و پردازش پسماند آلی یا مواد هضم‌شده، اجتناب‌ناپذیر است. اگر این مواد به صورت پیوسته پاکسازی و حذف نشوند منجر به تولید بو خواهند شد.

بهترین روشی که می‌توان برای کاهش اثر بوی منابع کاری و تولید پیوسته بو در تأسیسات پیشنهاد کرد این است که مدت زمان تماس پسماند آلی با هوای آزاد را به حداقل رساند. برای دستیابی به این هدف، زمان‌بندی تحویل خوراک باید به گونه‌ای باشد که مقدار مواد آلی موجود در اماکن نگهداری روباز به حداقل رسیده و برنامه‌ای برای مدیریت و انتقال مواد هضم‌شده فعال وجود داشته باشد. در بسیاری از مناطق شهری، وجود هر گونه سیستم مدیریت پسماند آلی در محوطه باز، به تنهایی برای بلند شدن اعتراضات از طرف ساکنین اطراف کافی است. در این گونه موارد، مدیریت تمام مواد آلی در داخل تأسیسات مجهز به سیستم‌های تصفیه هوا با فشار منفی لازم و ضروری است. به عنوان اقدامات کلی نظافت کارگاهی، تأسیسات باید به گونه‌ای طراحی شود که رواناب حاصل از بارندگی و شیرابه حاصل از نگهداری خوراک یا مواد هضم‌شده در محوطه باز جمع‌آوری و تصفیه شده و در صورت نیاز، فعالیت‌های تعمیر و نگهداری و پاک‌سازی به صورت منظم انجام شود.

منشأ تولید بو می‌تواند مواد شیمیایی فرار موجود در هوا باشد که به وسیله حسگرهای بویایی در انسان تشخیص داده می‌شود. شیمی بو پیچیده است. به طور کلی، رایج‌ترین دسته‌بندی ترکیبات شیمیایی که باعث به وجود آمدن نگرانی‌ها در خصوص بو می‌شوند عبارتند از: ۱) ترکیبات احیاشده گوگرد در خوراک یا مواد هضم‌شده؛ ۲) اسیدهای چرب فرار مانند اسید بوتیریک، که یک ترکیب میانی در فرایند تجزیه زیستی هضم بیهوازی است؛ و ۳) ترکیبات نیتروژن‌دار در خوراک یا مواد هضم‌شده. خلاصه‌ای از ترکیبات بودار در جدول (۷-۱) ارائه شده است.

جدول)۱۷-۱(ترکیبات بالقوه بودار در تأسیسات هضم بیهوازی

ترکیب	منبع	بو
گوگرد غیرآلی (سولفید هیدروژن)	شیرابه، مواد جامد زیستی	تخم‌مرغ گندیده
گوگرد آلی (مرکاپتان‌ها[1])	پسماندهایی که در شرایط بیهوازی نگهداری می‌شوند	تخم‌مرغ گندیده
سولفیدهای آلی	تولید کمپوست	مدفوع
نیتروژن غیرآلی (آمونیاک)	خوراک با نیتروژن بالا (مانند فضولات مرغی)	ادرار
نیتروژن آلی (آمین‌ها)	تولید کمپوست	ماهی
اسیدهای چرب	پسماندهایی که در شرایط بیهوازی نگهداری می‌شوند	سرکه
آروماتیک‌ها / اسید بوتیریک	هضم بیهوازی	شیر ترش‌شده

۱۷-۳- طراحی و اقدامات برای کاهش بو

طراحی تأسیسات فاکتور مهمی در کنترل مؤثر بو است. المان‌های طراحی که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از:

- تمام مواد تولیدکننده بو و تمامی فرایندهای مدیریت مواد باید در محیطی بسته که فشار آن منفی است، نگهداری و انجام شوند تا از این طریق، تمام هوای بالقوه بدبو گرفته و جمع‌آوری شده و به اجبار به سیستم کنترل بو یا به مکانی که در عمل از جریان‌های هوایی استفاده نمی‌شود هدایت شود.
- منابع اصلی تولید بو (مانند فضولات، پسماند مواد آلی تفکیک‌شده در مبدأ و ...) باید در محوطه‌های کاملاً بسته نگهداری شوند تا تماس آنها با هوا کاهش یابد.
- سیستم تهویه مطبوع تأسیسات باید بر اساس دفعات تعویض هوا در ساعت (ACH)[2] که توسط سیستم تهویه مطبوع قابل تأمین باشد و سرعت مواجهه هوا[3] با درب‌ها، طراحی شود.
- تمام درب‌های مرتبط با ساختمان‌های پردازش باید به یک سیستم هشداردهنده متصل باشند تا در صورت باز ماندن درب‌ها، به اپراتورها هشدار دهد.
- برای کاهش جریان و مکش هوا و برای ایزوله کردن فعالیت‌های بدبوتر، باید داخل ساختمان‌ها پارتیشن‌بندی شود.
- برای کنترل تعداد درب‌هایی که در آن واحد باز هستند باید درب مربوط به کارکنان، درب تردد کامیون‌ها و درب سالن‌های دریافت در تأسیسات به یکدیگر متصل باشند.
- دسترسی به محل ورود وسایل نقلیه به ساختمان پردازش باید از طریق درب‌های کرکره‌ای واکنش سریع[4] که با یک سوئیچ فشاری باز و بسته می‌شوند، صورت گیرد.

[1] Mercaptan
[2] Air Changes per Hour (ACH)
[3] سرعت هوا که در ورود به یا خروج از یک سیستم تهویه مطبوع اندازه‌گیری می‌شود : Air Face Velocity
[4] Fast Acting Roller Shutter Doors

- طراحی باید در برابر مشخصات مورد انتظار فرایند، انعطاف‌پذیر باشد. اگر طراحی، انعطاف‌پذیر باشد می‌توان اختلالات پیش‌بینی شده مانند تحویل بیش از ظرفیت خوراک یا کاهش ظرفیت تولید را مدیریت کرد.

این ویژگی‌های طراحی عمدتاً مربوط به تأسیسات هضم بیهوازی مقیاس بزرگی است که در همسایگی مناطق حساس به بو، به طور کلی، مناطق شهری در حال بهره‌برداری هستند. در مناطقی که حساسیت به بو کمتر است اغلب می‌توان با بکارگیری ادوات ساده‌تر، ارتباطات خوب با همسایگان را حفظ کرد. در تأسیسات هضم بیهوازی که در مناطق روستایی احداث می‌شود تمرکز باید بر شیوه‌های مناسب حمل و نقل و کاهش مقدار خوراکی که پیش از تغذیه به سامانه هضم در هوای آزاد دپو می‌شود، معطوف شود.

تمام هاضم‌ها باید طرح‌ها و گزینه‌های جایگزین برای شرایطی داشته باشند که انباشتگی خوراک از ظرفیت پردازش هاضم بیشتر شود. این طرح‌ها باید فاکتورهای فصلی مانند تولید بو در ماه‌های گرم تابستان را در بر داشته باشند.

برای کاهش بو هنگام مدیریت خوراک، موارد زیر باید در نظر گرفته شوند:

- برای اطمینان از این که مواد تقریباً همزمان با دریافت، پردازش می‌شوند باید زمان نگهداری خوراک در سایت به حداقل رسیده و پروتکل‌های عملیاتی اجرا شوند.
- نباید پذیرش خوراک بیشتر از ظرفیت قابل مدیریت سالن دریافت موجود باشد.
- تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه تجهیزات و کلیه سطوح ساختمانی باید به صورت منظم انجام شود تا خرابی تجهیزات به حداقل رسیده و اطمینان حاصل شود که مواد تولیدکننده بو در تأسیسات انباشته نخواهند شد.

۱۷-٤- سیستم‌های کنترل بو

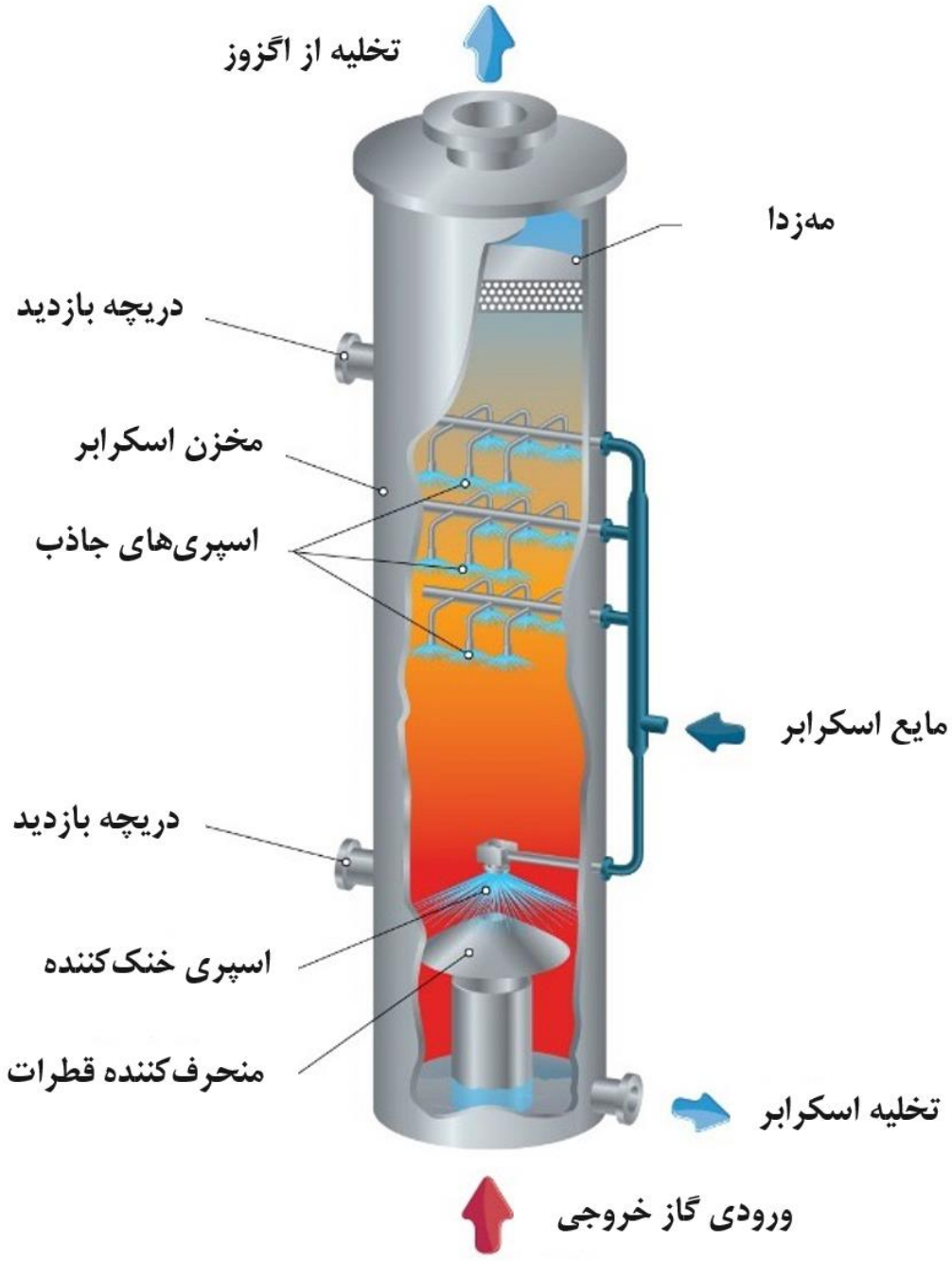
در مبحث کنترل بو، ملاحظه اصلی در طراحی، کنترل گردش هوا است. کنترل گردش هوا از نقطه جمع‌آوری پسماند آلی شروع می‌شود. اگر پسماندهای آلی در یک محیط باز، به ویژه در یک روز گرم، باقی بمانند به سرعت تجزیه شده و بوی زیادی تولید خواهند کرد.

یکی از مزایای تأسیسات هضم بیهوازی در مقایسه با تأسیسات تولید کمپوست به روش هوازی این است که در آن، هوا در مخازن فرایندی گردش نمی‌کند و در مواد هضم‌شده نهایی، بسیاری از ترکیبات تولیدکننده بو تجزیه شده‌اند.

اولین گام در کنترل بو، ایزوله کردن پسماند آلی از محیط ساختمان است. اگر ایزولاسیون انجام شود، در آن صورت کنترل بو دو بخش خواهد داشت. بخش اول، ایجاد محفظه ایمن[1] در داخل ساختمان پذیرش و پردازش پسماند آلی می‌باشد. برای دستیابی به این منظور، طراحی سیستم تهویه مطبوع باید به گونه‌ای انجام شود که اهداف زیر محقق و حفظ گردد: ۱) در ساختمان نگهداری و مدیریت پسماند آلی، فشار منفی حاکم باشد، ۲) سرعت مواجهه هوا در درب‌ها و مداخل ورودی مناسب باشد، و ۳) دفعات تعویض هوا در هر ساعت، برای هر اتاق مناسب باشد.

بخش دوم، حذف بو از سیستم تهویه مطبوع پیش از رهاسازی در جو می‌باشد. الزامات سیستم‌های کاهش بو وابسته به ترکیب شیمیایی جریان هوای فرایندی و موقعیت نزدیکترین گیرنده‌های حساس است.

[1] Containment



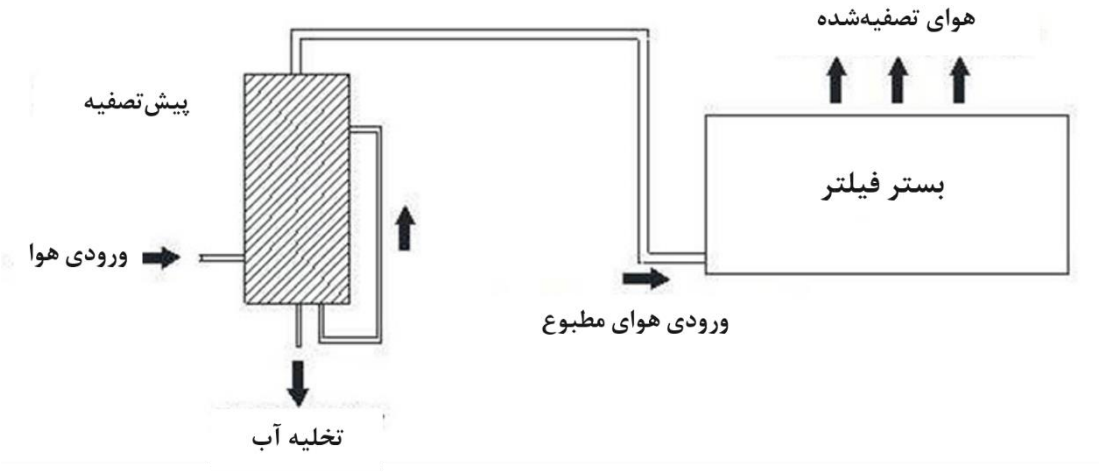
شکل (۱۷-۱) اسکرابر تر

در طراحی سیستم‌های کاهش بو باید فناوری‌هایی بکارگرفته شود که باعث کاهش بوی خاص ناشی از ترکیبات موجود در هوای فرایندی شود و در طراحی این سیستم‌ها برای مدیریت بوی مورد انتظار در رخدادهایی که منجر به تولید حداکثری بو می‌شوند، جانب احتیاط رعایت شود. مطابق با مدلسازی انتشار بو، فناوری تصفیه بو باید مقدار ترکیبات بدبوی موجود در هوای منتشرشده را به کمتر از آستانه پیش‌بینی‌شده که سبب آزار گیرنده‌های حساس همجوار می‌شود، کاهش دهد. انتخاب یک سیستم تصفیه بو، خاص تأسیسات هضم بیهوازی باید با کمک یک متخصص واجد شرایط انجام شود. بسته به مشخصات هوای فرایندی، به منظور کاهش مؤثر بو ممکن است استفاده از چندین فناوری در سیستم تصفیه بو ضروری باشد. فناوری‌های زیر برای استفاده در سیستم کاهش بو معرفی می‌شوند:

- **اسکرابرهای تر:** مطابق شکل (۷-۱)، هوای بدبو از میان یک برج متراکم[1] یا یک برج افشانه[2]، که معمولاً ۲ تا ۴ متر ارتفاع داشته و از چندین طبقه تشکیل می‌شود، به سمت بالا حرکت می‌کند و در مقابل، آب به سمت پایین فرو می‌ریزد و با هوای بدبو برخورد می‌کند. ترکیبات بدبو در آب حل می‌شوند، آبی که ممکن است همراه با مواد شیمیایی اسیدی یا قلیایی یا اکسیدکننده‌های شیمیایی باشد. آب یا محلول آب و مواد شیمیایی پس از اشباع، به آهستگی تخلیه می‌شود و برای بی‌اثر کردن ترکیبات حل‌شده، تصفیه می‌شود. شستشو با آب روشی مؤثر برای حذف گوگرد و آمونیاک است. در این روش، فضای مورد نیاز به نسبت کوچک است و شستشوی تر با دبی جریان بالا مقرون به صرفه است. از معایب روش شستشوی تر می‌توان به مواردی همچون هزینه‌بر بودن تصفیه جریان فرایندی اسیدی یا قلیایی، یخزدگی در محیط‌های سرد و نیاز به پاک‌سازی دوره‌ای اشاره کرد.
- **فیلترهای کربنی:** هر چند از فیلترهای کربنی معمولاً برای حذف سولفید هیدروژن استفاده می‌شود، اما مطابق شکل (۷-۲)، می‌توان از آنها برای حذف دیگر ترکیبات بدبو استفاده کرد. عوامل تولید بو هنگام عبور هوای بدبو از میان یک برج یا یک مخزن استوانه‌ای، جذب محیط کربنی[3] داخل آن می‌شوند. بسته به اندازه فیلتر کربنی و غلظت ترکیبات بدبو، محیط کربنی داخل فیلتر باید هر ۲ تا ۱۸ ماه تعویض شود. فیلترهای کربنی از نظر فضا، بسیار کارآمد و از نظر کارکرد، بسیار ساده هستند. تعویض دوره‌ای محیط کربنی و حساسیت به رطوبت، از معایب فیلترهای کربنی است. فیلترهای کربنی کارآیی لازم برای حذف آمونیاک را ندارند.

  فیلترهای کربنی باید مجهز به [سیستم] پایش پیوسته نفوذ[4] باشند که در بستر محیط کربنی یا بعد از هر بستر محیط کربنی در صورتی که از چندین فیلتر به صورت سری استفاده شود، تعبیه می‌شود. در شکل (۷-۲)، پیکربندی متداول سیستم‌های فیلتردار کربنی نمایش داده شده است که در آن، امکان تعویض محیط کربنی بدون انتشار بو به محیط وجود دارد.

[1] Packed Tower
[2] Misting Tower
[3] Carbon Media
[4] Continuous Breakthrough Monitoring



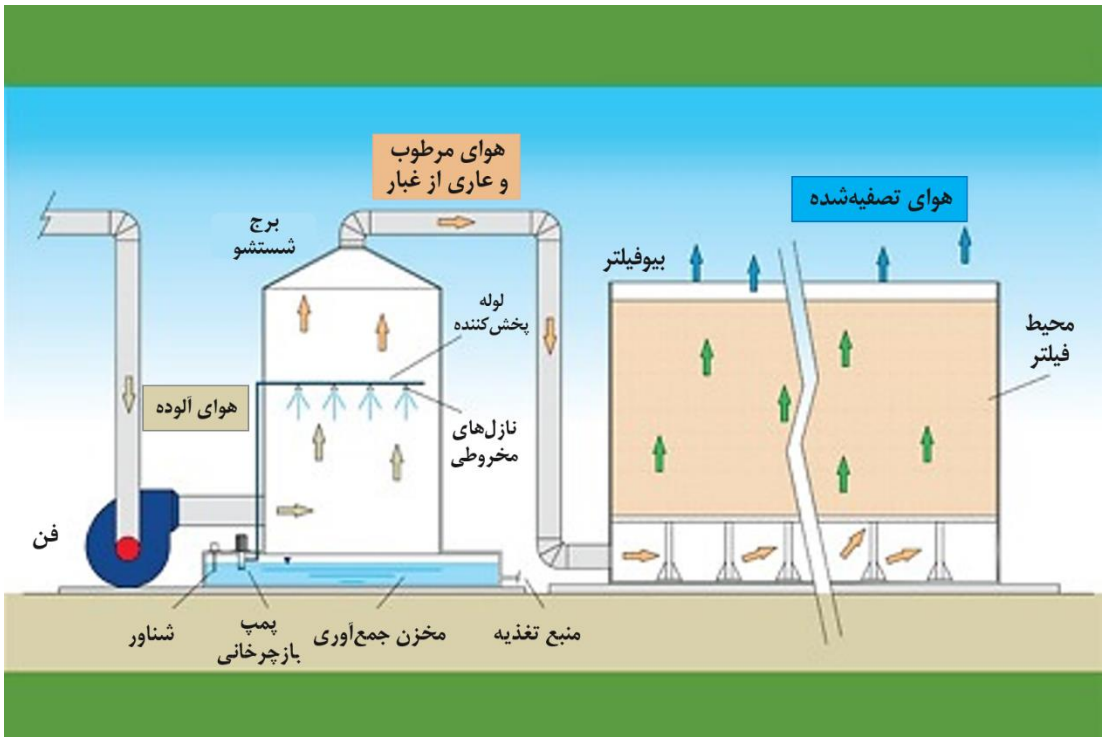
شکل (۱۷-۲) فیلترهای کربنی

- **<u>شستشوی بیولوژیکی:</u>** شیوه کار شستشوی بیولوژیکی[1] همانند شستشوی تر است، با این تفاوت که ترکیبات بدبو به وسیله جمعیتی از میکروارگانیسم‌ها که این ترکیبات را می‌سوزانند، کاهش می‌یابد. اگر این سیستم به خوبی طراحی شده باشد در مقایسه با اسکرابر تر نیاز به تعمیرات و نگهداری کمتری داشته و هزینه‌های کارکردی پایین‌تری دارد. یک سیستم بیولوژیکی می‌تواند خود را با تغییراتی که ممکن است در غلظت نسبی ترکیبات بدبو ایجاد شود، سازگار کند زیرا جمعیت میکروب‌ها متناسب با وجود ترکیبات بدبویی که آنها قادر به سوزاندن هستند، افزایش خواهد یافت. از معایب روش اسکرابر بیولوژیکی، نیاز به فضای بزرگتر و نیاز به حفظ پایداری در سیستم بیولوژیکی است. کنترل رطوبت و دما برای نگهداری یک سیستم بیولوژیکی پایدار ضروری است.
- **<u>فیلتر بیولوژیکی (بیوفیلتر):</u>** روش فیلتر بیولوژیکی (بیوفیلتر)[2] شامل یک مرحله پیش‌تصفیه برای حذف ریزگردها[3] و آئروسل‌ها[4]، همچنین گرفتن گرما و رطوبت جریان هوای بدبوی ورودی است. در ادامه، هوا از محیط کِشتی که روی آن جمعیت بیولوژیکی از میکروارگانیسم‌ها رشد کرده‌اند، عبور می‌کند. مطابق شکل (۷-۳)، این جمعیت میکروبی در نهایت ترکیبات بدبو را از بین می‌برند. اگر سیستم فیلتر بیولوژیکی به خوبی طراحی شده باشد در مقایسه با اسکرابر تر یا اسکرابر بیولوژیکی، نیاز به تعمیرات و نگهداری کمتری داشته و هزینه کارکردی آن هم پایین‌تر است. در برخی موارد، می‌توان از فیلتر بیولوژیکی به عنوان مرحله پرداخت[5] بعد از اسکرابر شیمیایی تر استفاده کرد.

سیستم فیلتر بیولوژیکی می‌تواند خود را با تغییراتی که ممکن است در غلظت نسبی ترکیبات بدبو ایجاد شود، سازگار کند. از معایب روش فیلتر بیولوژیکی، نیاز به فضای بزرگتر برای رسیدن به زمان تماس مورد نیاز،

[1] Bioscrubbing
[2] Biofilter
[3] Particulates
[4] ذرات ریز جامد و مایع معلق در هوا و یا گاز : Aerosols
[5] Polishing Step

که زمان تماس با بستر تهی[1] نامیده می‌شود، و نیاز به حفظ پایداری در سیستم بیولوژیکی است. کنترل رطوبت و دما برای نگهداری یک سیستم بیولوژیکی پایدار ضروری است.



شکل (۱۷-۳) فیلتر بیولوژیکی و فیلتراسیون بیولوژیکی

- **اکسایش الکتریکی، یونش تابشی و اکسایش با هوای یونیده:** اکسایش الکتریکی، یونش تابشی و اکسایش با هوای یونیده[2] فناوری‌های مختلفی هستند که از اکسیژن و بخار آب موجود در هوا، برای تبدیل مولکول‌های اکسیژن به مولکول‌های بسیار واکنش‌پذیر استفاده می‌کنند تا ترکیبات بدبوی منتشرشده از تأسیسات هضم بیهوازی را به صورت شیمیایی اکسید کنند. در این سیستم‌ها از جریان برق و تلفیق میدان‌های الکتریکی، اشعه فرابنفش (UV)، تخلیه هاله‌دار[3] و کاتالیست‌های تجزیه‌کننده مولکول‌های تولیدکننده بو، برای تأمین انرژی واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. هوای بدبو هنگام عبور از محفظه واکنش در معرض یک محیط پرانرژی قرار می‌گیرد که منجر به تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود که بلافاصله مولکول‌های تولیدکننده بو را اکسید می‌کنند. این سیستم‌ها مساحت کمی اشغال می‌کنند و برای کار به آب جاری یا مایعات دیگر وابسته نیستند. در نتیجه، تجهیزات اکسایش و یونش اغلب مساحت اشغال‌شده نسبتاً کمی دارند. در این سیستم‌ها، نیاز به انرژی و نیاز به حفظ تمیزی محفظه واکنش یک نقطه ضعف است.

[1] Empty Bed Contact Time (EBCT)
[2] Electro-oxidation, Photoionization, and Ionized Air Oxidation
[3] [برق و الکترونیک] تخلیه هاله‌دار نوعی تخلیه الکتریکی به رنگ آبی مایل به ارغوانی است که در صورت افزایش ولتاژ از مقدار بحرانی، روی سطح جسم و اطراف آن ظاهر می‌شود. علت این پدیده یونش هوای اطراف توسط ولتاژ زیاد است.

- **اکسایش حرارتی:** از اکسیدکننده‌های حرارتی به صورت صنعتی برای از بین بردن ترکیبات آلی فرار بدبو[1] و آلاینده‌های خطرناک هوا[2] استفاده می‌شود. اکسیدکننده‌های حرارتی برای تجزیه مولکول‌های تولیدکننده بو از حرارت استفاده می‌کنند. در نتیجه، اکسیدکننده‌های حرارتی به منبع سوخت نیاز دارند که می‌تواند بیوگاز، گاز طبیعی یا برق باشد. نیاز به سوخت هزینه کارکردی بیشتری دربر خواهد داشت. از اکسیدکننده حرارتی می‌توان برای از بین بردن انتشارات متان که ممکن است به داخل اگزوز بهبوددهنده بیوگاز کشیده شود استفاده کرد. در این حالت، ممکن است مقدار سوخت اضافی مورد نیاز برای کار کردن اکسیدکننده حرارتی کاسته شده و مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان بیشتری کاهش یابد.

[1] Volatile Organic Compound (VOC)
[2] Hazardous Air Pollutant (HAP)

۱۸- فصل هیجدهم : طرح‌ریزی اقتضائی، ایمنی و پاسخ به نشت

۱۸-۱- مقدمه

در تأسیسات هضم بیهوازی مخاطراتی وجود دارد که بعضاً آزاردهنده و حتی ممکن است تهدیدکننده زندگی باشند. بعضی از مخاطرات مانند استفاده از تجهیزات دوار و وسایل نقلیه بزرگ، در سایت‌های صنعتی و کشاورزی رایج است. بعضی از مخاطرات مانند قابلیت اشتعال، خطر انفجار، گازهای سمی و ورود به اماکن محبوس، خاص هضم بیهوازی و بیوگاز هستند. نهادهای نظارتی استانی مرجع تصمیم‌گیری نهایی در مورد الزامات مربوط به اقدامات ایمنی و کاهش خسارت در محیط کار هستند.

در این دستورالعمل، تنها مباحث کلی مربوط به مخاطرات ایمنی جنبه‌های خاص تأسیسات هضم بیهوازی و ملاحظات کلی برای کاهش این مخاطرات مطرح می‌شود.

به اپراتورهای تأسیسات هضم بیهوازی اکیداً توصیه می‌شود از راهنمایی‌های یک متخصص ایمنی برای شناسایی مخاطرات احتمالی و روش‌های مناسب برای کاهش آنها در تأسیسات مربوط به خود استفاده کنند. انجام ارزیابی رسمی با استفاده از تکنیک آنالیز مخاطرات و راهبری عملیات[1]، تکنیک مدیریت ایمنی فرایند[2] یا روش‌های مشابه توصیه می‌شود.

باید به این مسائل، از جمله مقررات و پروتکل‌های ایمنی در محل کار که ممکن است در حوزه نظارتی محل احداث تأسیسات اعمال شوند، توجه شود.

۱۸-۲- گازهای سمی

بسته به خوراک مورد استفاده، ممکن است بیوگاز حاوی سولفید هیدروژن (H_2S) از ۱۰ تا بیش از (ppm[3]) ۱۰.۰۰۰ باشد. گوگرد در اغلب موارد در خوراک‌های با پروتئین بالا یافت می‌شود و به شکل سولفیدهای محلول و گاز H_2S طی فرایند تجزیه زیستی آزاد می‌شود.

سولفید هیدروژن کشنده است. سولفید هیدروژن یک گاز قابل اشتعال، خورنده و بی‌رنگ است که بسیار سمی است و نیاز به آموزش خاصی دارد. چگالی سولفید هیدروژن از هوای موجود در جو بیشتر است و در اغلب شرایط محیطی، در مناطق کم ارتفاع، چاه‌ها، گودال‌ها، چاه‌های خشک‌شده و زیر زمین فرو رفته و جمع می‌شود. مقادیر کم از سولفید هیدروژن بوی شدید مانند تخم‌مرغ گندیده می‌دهد و در اوایل، افرادی که در معرض آن قرار می‌گیرند از خستگی حس بویایی آزرده می‌شوند، با این وجود اگر افراد به صورت پیوسته در معرض مقادیر کمی از این بو قرار داشته باشند ممکن است حس بویایی خود را از دست داده و خطرات احتمالی مخفی بماند. اگر غلظت سولفید هیدروژن بالا باشد به وسیله حس بویایی قابل احساس نخواهد بود چرا که به سرعت حس بویایی فرد را از کار خواهد انداخت.

[1] Hazard and Operability (HAZOP)
[2] Process Safety Management Review (PSMR)
[3] Parts Per Million (ppm)

استشمام بوی سولفید هیدروژن در تأسیسات هضم بیهوازی نشان از یک مسأله بزرگتر است، به این معنا که نشت بیوگاز وجود دارد که محتوی گاز قابل اشتعال یا قابل انفجار متان است. پس از اتخاذ تدابیر امنیتی مناسب، منبع سولفید هیدروژن باید شناسایی شده و هر گونه نشتی برطرف شود. راهنمای غلظت سولفید هیدروژن در جدول (۸-۱) ارائه شده است.

جدول)۱۸-۱(غلظت سولفید هیدروژن

غلظت (ppm)	علائم	توضیحات
۱	بوی تخم‌مرغ گندیده	
۵	بوی شدید	
۱۰	بوی متعفن و بسیار تند	محدودیت میانگین وزنی زمانی
۱۵	سوزش بینی/گلو، همراه با سرفه کردن	محدودیت قرار گرفتن در معرض کوتاه مدت
۱۰۰	سوزش بینی/گلو، همراه با سرفه کردن	بلادرنگ برای زندگی و سلامتی خطرناک است
۱۵۰	از دست دادن آنی حس بویایی	
۲۰۰	اِدِم ریوی	
> ۵۰۰	مرگ	

برای کنترل گازهای سمی ابتدا لازم است محل تولید این گازها در فرایند شناسایی شده و فرایندهای متناظر با آن ایزوله شوند. به طور معمول، سولفید هیدروژن از نقطه تولید در داخل مخازن فرایند هضم بیهوازی تا نقطه‌ای که از جریان بیوگاز جدا می‌شود یافت خواهد شد. اماکن و خطوط لوله‌ای که سولفید هیدروژن در آن وجود دارد باید به دقت برچسب‌گذاری شوند. اگر طراحی، نگهداری و بهره‌برداری به طرز صحیح گازبندی‌شده باشد استفاده از این تجهیز ایمن خواهد بود.

سطح بعدی حفاظت پس از ایزوله‌کردن، کنترل‌های مهندسی است که شامل دور نگهداشتن تجهیزات حاوی بیوگاز از لحاظ فیزیکی از افراد و اماکن سرپوشیده است. کنترل‌های مهندسی شامل استفاده از پایشگرهای گاز[1] و سیستم‌های مدیریت و افت فشار گاز[2] با طراحی مناسب است.

آخرین خطوط دفاعی کارکنان عبارتند از آموزش، دستورالعمل‌ها، استفاده از پایشگرهای گاز فردی و تجهیزات حفاظت فردی که این موارد هرگز نباید جایگزین طراحی و تعمیرات و نگهداری مناسب تأسیسات شوند. استفاده نظام‌مند از پایشگرهای کیفیت گاز فردی که به طور منظم کالیبره می‌شوند، توصیه می‌شود. هنگام کار در سایت، تمام کارکنان در اماکنی که احتمال حضور گازهای خطرناک وجود دارد باید یک پایشگر گاز فردی همراه داشته و به خوبی در مورد خطرات، تبعات و راهبردهای مناسب کاهش مخاطرات احتمالی آموزش دیده باشند.

در طراحی سیستم‌های کاهش بو باید احتمال وجود سولفید هیدروژن در جریان هوای فرایندی به منظور کاهش رهاسازی آن در محیط، در نظر گرفته شده باشد. بسته به شرایط محیطی محلی، مقادیر مجاز انتشار آلاینده‌ها متفاوت خواهد بود.

[1] Gas Monitor
[2] Gas Handling and Relief Systems

۱۸-۳- فضاهای سرپوشیده

برای ورود به اماکن سرپوشیده، الزامات و مقررات محلی باید رعایت شود. در تأسیسات هضم بیهوازی اماکنی مانند مخازن نگهداری خوراک ورودی، مخازن هاضم، اسکرابرهای بو و برج‌های تصفیه گاز ممکن است به عنوان اماکن سرپوشیده در نظر گرفته شوند.
به اپراتورهای تأسیسات هضم بیهوازی اکیداً توصیه می‌شود از راهنمایی‌های یک متخصص ایمنی برای شناسایی اماکن سرپوشیده و تهیه برنامه‌ها و دستورالعمل‌های مدیریت مناسب در تأسیسات مربوط به خود استفاده کنند.
اگر قرار است کاری در محیط سرپوشیده انجام شود، به عنوان مثال تمیز کردن پسماند جامد از مخزن هاضم، باید نحوه دسترسی به محیط سرپوشیده و برنامه نجات و مستندسازی آن در صورت نیاز طبق مقررات استانی تهیه، بررسی و تکمیل شود. آموزش مناسب کارکنان و مستندسازی هم ضرورت دارد.
در هنگام استفاده از هاضم‌های نوع خشک باید توجه ویژه‌ای به موضوع فضاهای سرپوشیده و اپراتورهای در حال کار با تجهیزات بارگیری چرخدار شود که وظیفه بارگیری یا تخلیه مخازن هضم خشک را برعهده دارند. درک این موضوع که چه زمانی یک مکان، فضای سرپوشیده در نظر گرفته می‌شود و چه زمانی همان مکان با تغییر شرایط، فضای سرپوشیده در نظر گرفته نمی‌شود حائز اهمیت است.
عدم رعایت مقررات و عدم اتخاذ تدابیر امنیتی مناسب می‌تواند منجر به مرگ و پیگرد کیفری و حبس برای مدیران و سرپرستان شود.
موارد زیر نمونه‌هایی از دستورالعمل‌های ایمنی است که باید رعایت شوند. این فهرست کامل نیست:

- فضای سرپوشیده دارای یک سیستم تهویه است که پیش از ورود اپراتور فعال می‌شود.
- پیش از ورود، شرایط داخل فضای سرپوشیده باید از نظر وجود گازهای خطرناک یا پایین بودن سطح اکسیژن مورد بررسی قرار گیرد.
- انجام عملیات در داخل فضای سرپوشیده و احتمال وقوع خطر باید بررسی شود. به عنوان مثال، استفاده از لودر بابکت اسکید استیر گازسوز[1] در داخل مخزن هاضم، خطر تولید گاز مونوکسید کربن را به همراه دارد.
- استفاده از پایشگر ایمنی و کارکنان نجات که در بیرون از فضای سرپوشیده مستقر هستند به همراه تماس تصویری و شنیداری مستمر با کارگران داخل فضای سرپوشیده.
- پاک‌سازی فضای سرپوشیده از موادی که ممکن است اتمسفر داخل فضا را مسموم کنند باید اولویت اول خدمه باشد.
- پیش از شروع به کار، نقشه نجات باید تهیه و به تمام دست‌اندرکاران تفهیم گردد.
- فضای سرپوشیده باید ایزوله شده و تمام تجهیزات و فرایندهای مرتبط از دسترس خارج شوند[2]. به عنوان مثال، پمپ‌هایی که مخزن را پر می‌کنند و همزن‌های داخل مخزن باید از دسترس خارج شوند.

[1] Bobcat Skid Steer Loader
[2] Lock out

۱۸-٤- آتش

در صورتی که غلظت متان، که جزء اصلی بیوگاز است، در هوا بین ۵ تا ۱۵ درصد باشد قابل اشتعال است. در صورتی که متان با هوا ترکیب شود می‌تواند ترکیب قابل انفجاری را ایجاد کند. اگر غلظت دی اکسید کربن بالا باشد ممکن است برای اشتعال‌پذیری، میزان رقیق‌سازی با هوا افزایش یابد، اما این موضوع بستگی به غلظت متان و دی اکسید کربن دارد.

صرفنظر از این موضوع، آتش در تأسیسات هضم بیهوازی که در آن بیوگاز تولید و مدیریت می‌شود، یک خطر محسوب می‌گردد.

در زمان راه‌اندازی، که تولید بیوگاز در داخل هاضم تازه شروع شده و هوا از طریق سامانه بیوگاز جابجا می‌شود، احتمال تشکیل مخلوط‌های خطرناک از بیوگاز و هوا وجود دارد.

در شرایط کارکرد عادی تأسیسات هضم بیهوازی، مخلوط‌های بیوگاز و هوا در هیچ کجای فرایند وجود ندارد. عملیات تزریق هوای فعال به سامانه‌های هضم بیهوازی به عنوان ابزاری برای کنترل غلظت سولفید هیدروژن در بیوگاز مورد استفاده قرار می‌گیرد که هنگام انجام آن، باید احتیاط لازم بعمل آید.

دو راهکار اصلی برای پایش و کاهش خطر نفوذ هوا وجود دارد:

۱- راهکار اول، پایش مستمر سطح اکسیژن در بیوگاز است. اکسیژن باید جزء قابل چشم‌پوشی (کمتر از ۰/۴ درصد) در بیوگاز باشد. افزایش غلظت اکسیژن، یک علامت هشداردهنده از احتمال تشکیل مخلوط بیوگاز و هوا است و شاخصی است که نشان می‌دهد نفوذ هوا در جریان است. در بسیاری از هاضم‌ها، فضای خالی[1] زیادی بالای مواد در حال هضم وجود دارد که در صورت نشت هوا، ممکن است مخلوط بیوگاز و هوا در این فضا وجود داشته باشد.

۲- راهکار دوم، انجام بازرسی‌های مرسوم در زمان تعمیرات و نگهداری برای نشت‌یابی یا شناسایی آسیب‌های وارد بر سیستم لوله‌کشی است. با انجام بازرسی‌های چشمی و ممیزی‌های نشت بیوگاز می‌توان مطمئن شد که هیچ راهی برای نفوذ هوا وجود ندارد.

تجهیزات مناسب پایش آتش مانند آشکارسازهای دود یا چشمی‌های تشخیص آتش[2] نیز باید در نظر گرفته شوند.

برای مقابله با خطر آتش‌سوزی، باید برنامه مدیریت ریسک و واکنش اضطراری تهیه شود. در این برنامه باید اماکنی که دارای بیشترین نگرانی هستند مشخص شده و هر گونه خطری که جابجایی در این اماکن ممکن است ایجاد کنند شناسایی شوند. این برنامه باید با اداره آتش‌نشانی محلی در میان گذاشته شود تا از مخاطرات عدم مهار آتش در تأسیسات هضم بیهوازی مطلع شوند. تمام تأسیسات هضم بیهوازی پس از مرحله طراحی، باید ارتباط مستمر خود با اداره آتش‌نشانی محلی را حفظ کنند و با پیشنهاد برگزاری تورهای بازدید، از آشنایی اداره آتش‌نشانی محلی با سایت اطمینان حاصل کنند.

اغلب تأسیسات هضم بیهوازی مکانی برای نگهداری موقت بیوگاز به شکل محفظه غشایی نگهداری گاز[3]، در سایت خود دارند. اگر تعمیرات و نگهداری و پایش به منظور جلوگیری از نفوذ هوا و دور از دسترس قرار دادن منابع حریق

[1] Headspace
[2] Fire Eye
[3] Membrane Gasholder

مانند گرما و جرقه انجام شـود، ذخیره‌سـازی گاز در داخل سـایت با خطر انفجار همراه نخواهد بود. در برنامه ارزیابی ایمنی باید به سناریوی بدترین حالت توجه شود: نشت بیوگاز در کجا محتمل است، چه چیزی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت، ممکن است در همسایگی محل نشت، چیز دیگری آتش بگیرد؟
در اغلب مقررات، برای به حداقل رسـاندن خطر انفجار، حریمی در اطراف اماکن ذخیره‌سـازی گاز در نظر گرفته می‌شـود. مشـعل‌ها، کمپرسـورها و سـایر منابع احتراق باید در فاصـله امنی از مکان ذخیره‌سازی گاز جانمایی شـوند. جانمایی سایت با طراحی مناسب می‌تواند ابزار کارآمدی برای کاهش خطر انفجار و آتش‌سوزی باشد.
توصیه می‌شـود سیاسـت عدم اسـتعمال دخانیات در فاصـله معینی از تمام محیط پیرامون تأسیسـات هضـم بیهوازی مؤکداً به اجرا گذاشته شود.

۱۸-۵- مدیریت وسایل نقلیه

در اغلب اوقات وسایل نقلیه بزرگ برای تخلیه خوراک و یا جمع‌آوری مواد هضم‌شده وارد تأسیسات هضم بیهوازی می‌شوند. وسایل نقلیه کاری مانند لیفتراک‌ها، جرثقیل‌های چنگک‌دار و کامیون‌ها نیز در کارکرد عادی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. در تأسیسات هضم بیهوازی باید علائم مناسب نصب شده باشد، مسیر حرکت خودروها به طور مشخص علامت‌گذاری شده باشد و فضای کافی متناسب با شعاع گردش وسایل نقلیه موجود در سایت وجود داشته باشد. کارکرد وسایل نقلیه خدمات‌رسانی و ضرورت رؤیت‌پذیری و تجهیزات حفاظت فردی برای اپراتورهای مشغول کار در سایت بر اساس مقررات استانی ایمنی کارگران تعریف می‌شود.

۱۸-۶- پاسخ به نشت و محفظه ایمن

برنامه اقتضـائی و برنامه واکنش اضـطراری باید برای تأسیسـات هضـم بیهوازی تهیه شـود و به همه کارگران باید در مورد پروتکل واکنش اضطراری آموزش داده شود. این برنامه‌ها باید طبق قاعده منظمی مورد بازبینی قرار گرفته و در صـورت نیاز، به روز رسـانی شـوند. مؤلفه‌های اصـلی برنامه جامع اقتضـائی و واکنش اضـطراری، که تنها به موارد زیر خلاصه نمی‌شوند، عبارتند از:

- فهرسـت کارکنان سـایت که مسـئول پیاده‌سـازی اقدامات اقتضـائی و وظایف مختلف برنامه واکنش اضـطراری هستند و نیازهای آموزشی آنها تهیه شود.
- فهرسـتی از تجهیزات و مواد مورد نیاز برای پیاده‌سـازی اقدامات اقتضـائی و واکنش حالت اضـطراری، شـامل نقشه سایت که محل اقلام موجود در فهرست پیش‌گفته را نشان می‌دهد، تهیه شود.
- برنامه تعمیر و نگهداری و تسـت تجهیزات مورد نیاز برای پیاده‌سـازی اقدامات اقتضـائی و واکنش حالت اضطراری تدوین شود.

- رویه‌هایی که باید به عنوان بخشی از پیاده‌سازی اقدامات اقتضائی و واکنش حالت اضطراری اتخاذ شوند، تدوین شود.
- اسامی و شماره تماس شرکت‌های مدیریت پسماند و ارائه خدمات برای واکنش اضطراری تهیه شود.
- پروتکل اطلاع‌رسانی به همراه اسامی و شماره تماس افرادی که باید با آنها تماس گرفته شود از جمله مالک، کارکنان سایت، اداره آتش‌نشانی و اداره پلیس محلی، مسئول بهداشت و درمان محلی، سازمان تنظیم مقررات محیط زیست و وزارت کار، تهیه شود.

در تهیه برنامه اقتضائی و واکنش اضطراری باید حوادث احتمالی که ممکن است منجر به وضعیت اضطراری شوند، مشخص شوند. اقدامات پیشگیرانه و کنترلی برای به حداقل رساندن دفعات رخداد یا آثار وضعیت‌های بحرانی باید مشخص شود. به عنوان مثال، در فهرست زیر وضعیت‌های احتمالی متداول، نیازمند اتخاذ رویه‌ها و اقدامات، که باید در برنامه‌های اقتضائی و واکنش اضطراری گنجانده شوند ارائه شده است:

- خوراک ورودی معیارهای کیفی لازم را نداشته باشد.
- مواد باقیمانده خروجی معیارهای کیفی لازم را نداشته باشد.
- گزینه‌های فعلی دفع مواد باقیمانده خروجی، خوراک پذیرش‌نشده و مواد هضم‌شده خارج از دسترس باشند.
- نیروگاه قادر به نگهداشت شرایط عادی جریان هوا نباشد.
- خرابی تجهیزات موجود در سایت، شامل سیستم تصفیه بو، منجر به انتشار آلاینده‌ها در جو و شکایت عمومی شود.
- رسیدگی به شکایات مستلزم پیاده‌سازی اقدامات بیشتر برای کنترلی بو باشد.
- رسیدگی به شکایات مستلزم توقف فعالیت‌های پردازش پسماند در سایت باشد.
- مواد هضم‌شده کیفیت لازم برای استفاده در سایت دریافت‌کننده را نداشته باشد.
- جریان برق قطع شود.
- بلایای طبیعی مانند سیل، آتش‌سوزی، کولاک و گردباد حادث شود.
- خاموش کردن اضطراری و راه‌اندازی تجهیزات در سایت از جمله سیستم کاهش بو رخ دهد.
- اختلال و وقفه در کار یا حمل و نقل به وجود آید.

۱۹- فصل نوزدهم : ارتباطات

۱۹-۱- مقدمه

آموزش همگانی سرمایه‌گذاری مهمی در کسب اقبال عمومی و پشتیبانی از پروژه‌های هضم بیهوازی است. داشتن یک برنامه ارتباط مؤثر می‌تواند به کمتر شنیده شدن پاسخ "هرجا باشد، در حیاط خلوت ما نباشد[۱]"، که در گذشته در برخی از پروژه‌های هاضم تجربه شده است، کمک کند. انجام گفتمان از منافع ایمنی، کنترل بو، منافع محیط زیستی و منافع اقتصادی بیوگاز با جوامعی که در نزدیکی پروژه‌های بزرگ هضم بیهوازی ساکن هستند، جائز اهمیت است. در اوایل ممکن است برخی از جوامع درک عمیقی از ایمنی، طراحی‌های کم مزاحمت و منافع قابل توجه پروژه‌های مدرن بیوگاز نداشته باشند. طراحی قدیمی یا چالش‌های کارکردی ممکن است باعث شود برای برخی از افراد جنبه‌های دردسرساز چنین تأسیساتی پررنگ‌تر باشد.

۱۹-۲- ملاحظات آموزش و مشاوره همگانی

فرایند مشاوره همگانی با فراهم کردن فرصت کافی برای طرح و پاسخگویی به نظرات، پرسش‌ها و نگرانی‌های همگانی و ذینفعان، می‌بایست به افزایش پشتیبانی از توسعه تأسیسات هضم بیهوازی کمک کند. در این فرایند می‌بایست با جوامع و کسب و کارهایی که از تأسیسات هضم بیهوازی متأثر خواهند شد در ارتباط بوده و مشارکت آنها را جلب کرد.

در جدول (۹-۱)، نگاهی گذرا بر ابزارهایی که برای ارتباط و مشاوره همگانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارائه گردیده و مزایا و نقاط ضعف هر ابزار بیان شده است. این جدول بر اساس مصاحبه با ذینفعان، بررسی‌های صلاحیتی و تجربه تیم کاری تهیه شده است. توصیه می‌شود توسعه‌دهندگان پروژه در خلال فرایند انتخاب سایت، چندین ابزار را بکار گرفته و برنامه مشاوره مناسبی متناسب با هر پروژه خاص تهیه کنند. عمق مشارکت و بازه زمانی، بسته به پروژه متفاوت خواهد بود.

[۱] در مهندسی محیط زیست و انرژی: باوری عمومی که طبق آن مردم خواهان دفع پسماندهای تولیدی هستند مشروط بر آنکه محل دفع در نزدیکی ملک آنها نباشد که عبارت Not in My Backyard (NIMBY) معادل انگلیسی آن است.

جدول)۱۹-۱(ابزار مشاوره و آموزش همگانی

ابزار	شرح	مزایا	نقاط ضعف
نامه اطلاع‌رسانی[1] به اشخاص علاقمند	کلیه ذینفعان شناخته‌شده، از جمله نمایندگی‌های شهری و استانی، عامه مردم، نواحی محلی همجوار، بومیان، تأسیسات مدیریت پسماند جامد یا تأسیسات پردازش پسماند آلی موجود، پیمانکاران و شرکت‌های حمل و نقل، تولیدکنندگان بزرگ پسماند، سازمان‌های محیط زیستی و خریداران احتمالی محصولات نهایی، باید شناسایی شده و برای مطلع ساختن آنها از پروژه مد نظر، ارتباط برقرار شود. در نامه اطلاع‌رسانی باید جنبه‌های کلی پروژه، منافع و معایب احتمالی برای ذینفعان، فرصت‌های پیش رو و زمان‌بندی تعیین‌شده برای پروژه اطلاع‌رسانی شود.	نامه جنبه شخصی دارد و به احتمال زیاد، بی پاسخ نخواهد ماند.	ممکن است همه ذینفعان شناسایی نشوند و هر ذینفعی که مستقیماً با او تماس گرفته نشود اطلاعات را از دست خواهد داد.
برگزاری جلسه با ذینفعان	برگزاری جلسات فرصت مناسبی ایجاد می‌کند تا پروژه رو در رو به ذینفعان معرفی شده و نظرات یا پرسش‌ها مطرح شوند.	تعامل رو در رو فرصت بیشتری برای گفتگو ایجاد می‌کند.	برگزاری جلسه بسته به محل ذینفعان ممکن است هزینه‌بر باشد. ممکن است همه ذینفعان شناسایی نشوند و هر ذینفعی که مستقیماً با او تماس گرفته نشود اطلاعات را از دست خواهد داد.
تارنما (پایگاه اینترنتی)	ایجاد یک صفحه اینترنتی با دسترسی آسان راه مناسبی برای دسترسی علاقمندان به اطلاعات است. در تارنما جزئیات پروژه شامل زمان‌بندی و چگونگی تأثیر آن بر منطقه ارائه می‌شود و رویدادها یا روش‌های مشارکت همگانی و ارسال نظرات در مورد پروژه اطلاع‌رسانی می‌شود. برگزاری جلسات همگانی و رویدادهای مشارکتی را هم می‌توان از طریق سایت‌های بزرگ اشتراک‌گذاری رویدادها مانند Eventbrite تبلیغ کرد.	دسترسی به جزئیات پروژه برای هر کس و از هر جایی امکانپذیر است.	افراد برای پیدا کردن تارنما باید از از پروژه آگاه باشند. برای هدایت ترافیک اینترنتی نیاز به تبلیغات است.
نظرسنجی همگانی[2]	نظرسنجی‌های همگانی روشی مؤثر برای سنجش افکار عمومی گروه‌هایی است که از پروژه متأثر می‌شوند. در یک نظرسنجی ممکن است میزان رضایتمندی همگانی از وضعیت کنونی خدمات مدیریت پسماند و مقبولیت گزینه‌هایی برای بهبود وضع موجود مورد پرسش قرار گیرد. همچنین می‌توان از یک نظرسنجی خوب برای آموزش فناوری و منافع پردازش پسماندهای آلی به شرکت‌کنندگان استفاده کرد. نظرسنجی ممکن است به صورت برخط، به وسیله تلفن، در یک غرفه، خانه به خانه یا ترکیبی از این روش‌ها انجام شود.	در این روش می‌توان از طیف گسترده‌ای از مردم نظرسنجی کرد و نتایج را بر حسب مکان، گروه سنی و غیره پایش کرد. در این روش به راحتی داده‌های قابل قیاس تولید می‌شود.	اگر پرسش‌ها کم‌اثر باشند ممکن است احساس رضایتمندی در عوام برای اظهار نظر را ایجاد نکند. به عنوان مثال، در پرسش‌های چند گزینه‌ای امکان دریافت پاسخ‌های پیش‌بینی‌نشده وجود ندارد، اما تجمیع و تحلیل پاسخ‌ها کم‌هزینه خواهد بود.

[1] Letter of Notification
[2] Community Survey

برگزاری جلسات همگانی	برگزاری جلسات برای جلب مشارکت همگانی، فرصت جمع‌آوری نظرات عموم مردم و امکان سنجش مقبولیت اجتماعی گزینه‌های پروژه را فراهم می‌کند.	فرصت ایده‌آلی برای کسانی است که علاقمند هستند در مورد پروژه بیشتر بدانند، پرسش کنند و در مباحث شرکت کنند. این کار می‌تولند منجر به تسهیل مشارکت دقیق و کامل- مانند برنامه‌ریزی گروهی یا کمیته‌های فنی متشکل از ذینفعان- شود.	ممکن است سازماندهی اینگونه جلسات دشوار یا هزینه‌بر باشد. ممکن است در این جلسات صرفاً افراد مغرض یا مخالف مشارکت کنند.
بازدید عمومی[1]	مکانی برای مشارکت همگانی به منظور ارائه اطلاعات در مورد پروژه، پاسخ دادن به سوالات و جمع‌آوری بازخورد همگانی است.	می‌تواند محیط مثبتی که در آن جریان معنادار اطلاعات بین کارکنان پروژه و مردم برقرار است، ایجاد کند. می‌تواند منجر به مشارکت عادلانه شود، مشارکتی که صدای مغرضین و معترضین کمتر غالب باشد.	ممکن است سازماندهی آن دشوار یا هزینه‌بر باشد. سطح مشارکت در مقایسه با جلسات همگانی پایینتر باشد.
تبلیغات در رسانه‌ها و شبکه‌های اجتماعی	بیان اهداف، راهبردها و آثار پروژه از طریق تولید محتوای قابل فهم در رسانه‌ها و شبکه‌های اجتماعی، راهکار مؤثری برای ارائه آموزش سطح بالا در مورد پروژه است. انتشار داده‌نگاشت[2] و ویدئوهای کوتاه از طریق گروه‌های Facebook یا از طریق Twitter روش‌های کارآمدی هستند و می‌توان جلسات پرسش و پاسخ برخط را از طریق تالارهای گفتگو[3] برگزار کرد. نشست‌ها و جلسات را می‌توان از طریق Facebook یا Twitter تبلیغ کرد.	روشی است که می‌توان به شکل رایگان به افراد زیادی، به ویژه نسل جوان، دسترسی داشت.	ممکن است قابل تعمیم به بخشی از جمعیت نباشد.
انتشار اخبار در رسانه‌های همگانی	رویدادها و نشست‌های مشارکت عمومی را می‌توان از طریق رادیو و ایستگاه‌های خبری تبلیغ کرد و اخبار مربوط به پیشرفت پروژه را اطلاع‌رسانی کرد.	امکان اطلاع‌رسانی به شکل مؤثر به جمعیت محلی وجود دارد.	ممکن است انجام تبلیغات هزینه‌بر باشد. باید انواع رسانه متناسب با جامعه هدف و بافت جمعیتی متناظر مشخص شود.

[1] رویداد یا زمانی که افراد طی آن می‌توانند از مکانی که در حالت عادی اجازه بازدید از آن را نداشتند، بازدید کنند (Open House)

[2] Infographic

[3] Forum

۲۰- فصل بیستم : پایش، نمونه‌برداری و مستندسازی

۲۰-۱- مقدمه

پایش مستمر پارامترهای فرایندی که پیشتر مورد بحث قرار گرفت، برای حفظ سلامت جمعیت باکتری‌ها در داخل هاضم به منظور بهینه‌سازی تولید پایدار بیوگاز و پردازش خوراک حیاتی است. بررسی روزانه داده‌های خوراک‌دهی و داده‌های کارکردی از بابت تشخیص زودهنگام مشکلات بیولوژیکی یا شیمیایی در هاضم‌ها یا مواد هضم‌شده، حائز اهمیت است. برای آن که به اپراتورهای نیروگاه امکان انجام تنظیمات لازم برای اطمینان از حفظ شرایط بیولوژیکی در حالت بهینه و برای تشخیص هر گونه مشکلی مانند کاهش نرخ تولید بیوگاز داده شود، داده‌ها حیاتی هستند.

۲۰-۲- پایش و نمونه‌برداری

۲۰-۳- مستندسازی

اپراتور تأسیسات وظیفه دارد سوابق کارکردهای روزانه در تأسیسات را ایجاد و نگهداری کند و از این اطلاعات، گزارشات ماهیانه و سالیانه تهیه کند. این سوابق شامل شکایات همگانی هم می‌شود. مستندسازی و گزارش‌نویسی، همچنین اطمینان از این که سوابق به طور منظم تکمیل می‌شوند بهترین اقدام مدیریتی برای سامانه‌هایی است که در مزارع کشاورزی احداث می‌شوند. نوع اطلاعاتی که لازم است به مدت ۵ سال در سایت نگهداری شوند و نوع اطلاعاتی که برای تهیه گزارش سالیانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، معمولاً در ضوابط صدور تأییدیه محیط زیستی فهرست خواهد شد. بنا بر خواست سازمان محیط زیست، که می‌تواند جزو شروط صدور تأییدیه باشد، ممکن است لازم باشد گزارش سالیانه هر ساله برای نهادهای مذکور و کمیته روابط عمومی ارسال شود. در هر صورت، تمامی گزارش‌ها عموماً باید بنا به درخواست، در اختیار کارکنان سازمان قرار گیرد.

برخی از اطلاعات که باید جمع‌آوری شده و محدود به موارد زیر نمی‌شود، عبارتند از:

- منبع، نوع، کیفیت و کمیت خوراک و مواد بهبوددهنده دریافتی؛
- نگهداری و پایش روزانه خوراک؛ اگر بیش از یک نوع ماده هضم‌شده تولید می‌شود دستورالعمل‌های کاری باید به روشنی نشان دهد که مواد مختلف در هر مرحله از فرایند جداگانه نگهداری شده و روزانه به صورت پشته یا پیوسته[1] رهگیری می‌شوند.
- اطلاعات کاری فرایند مانند دماها و زمان‌های ماند؛ این اطلاعات در صورت نیاز به صورت دستی، یا به وسیله سیستم کامپیوتری کنترل سرپرستی و گردآوری داده (SCADA) ثبت می‌شوند.
- سوابق تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه و تعمیرات چرخه عمر؛ ثبت این سوابق نشان می‌دهد آیا تأسیسات به طور مناسب مدیریت و نگهداری می‌شود یا خیر.

[1] Batch or Stream

- کیفیت، مقدار و مقصد (محل مصرف) مواد هضم‌شده و پسماند تولیدی که از تأسیسات خارج می‌شود؛
- ثبت تمام موارد نمونه‌برداری از خوراک و مواد هضم‌شده با جزئیات کافی که منبع تمام نمونه‌های گرفته شده را به روشنی نشان می‌دهد؛
- کلیه نتایج تست‌های تحلیلی مستخرج از گزارشات آزمایشگاهی یا تأییدیه‌های آنالیز مواد هضم‌شده یا خوراک؛
- ثبت تمام شکایات دریافت‌شده و اقدامات اصلاحی اتخاذشده برای رفع مشکلات. گزارش‌های تفصیلی مربوط به شکایات، به ویژه شکایات مربوط به بو، می‌تواند برای تعیین منشأ بو مفید باشند. به عنوان مثال، ارجاع متقابل شکایات مربوط به مراحل فرایند یا اقلام قابل تحویل سایت می‌تواند مشکلات تکراری را مشخص کرده و راه حل احتمالی آن را پیشنهاد دهد.

مراجع

[1] "Canadian Anaerobic Digestion Guideline: Food and Organic Waste Processing Facilities"; November 29, 2019

www.nri.ac.ir

تهران - شهرک قدس - انتهای بلوار شهید دادمان (پونک باختری) - صندوق پستی ۵۱۷-۱۴۶۶۵
تلفن : ۸۸۰۷۹۴۰۰ - فاکس : ۸۸۰۷۸۲۹۶