

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

مهندسی سیستم های انرژی – تکنولوژی انرژی

طراحی و ساخت هاضم بی هوازی به منظور تولید بیوگاز

نگارنده: محمود عباسی

اساتید راهنما:

دکتر سید مجید هاشمیان

دکتر محمود چهارطاقی

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۲۱/۹۹/۱۴۸
تاریخ: ۹۹/۲/۱۷

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

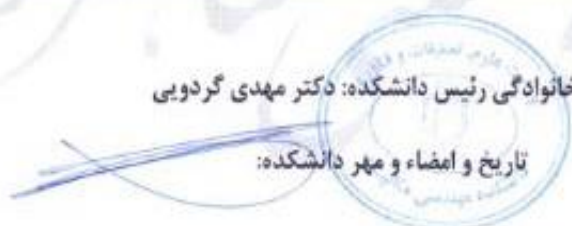
با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمود عباسی با شماره دانشجویی ۹۷۱۱۳۳۴ رشته مهندسی سیستم های انرژی گرایش نکتولوژی انرژی تحت عنوان طراحی و ساخت هاضم بیهوازی به منظور تولید بیوگاز که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید مجید هاشمیان	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمود چهارطاقی	دانشیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر احمد نظری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر اکبر ملکی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی سر رشته داری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم اثر

سپاس مخصوص خداوند مهربان است که به انسان توانایی و دانایی بخشید و به من این فرصت

را داد تا به این مرحله از علم رسیده و از هیچ محبتی دریغ نکرد و در تمام مراحل زندگی مرا

قوت قلب بود.

تقدیم به پدر مادر مهربانم که هر لحظه وجودم را از چشمه سار پر از عشقشان سیراب می کنند و

تقدیم به برادر و خواهران عزیزم که همیشه حامی من بوده اند.

شکر و قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهنمایی اساتید بزرگ موفق به پایان این رساله شده‌ام وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند را به عمل آورم:

در آغاز از استادان بزرگ و گران قدر جناب آقایان دکتر سید مجید هاشمیان و دکتر محمود چهارطاقی که راهنمایی این پایانامه را به عهده داشته‌اند کمال تشکر را دارم.

و از داوران گرامی دکتر اکبر ملکی و دکتر علی سررشته‌داری که زحمت داوری و تصحیح این پایانامه را به عهده داشتند کمال سپاس را دارم.

همچنین خالصانه از تمامی اساتید و معلمان و مدرسانی که در مقاطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته‌اند، قدردانم .

تعمدنامه

اینجانب **محمود عباسی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی فناوری انرژی دانشکده مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و ساخت هاضم بی‌هوازی به منظور تولید بیوگاز تحت راهنمایی **دکتر سید مجید هاشمیان و دکتر محمود چهارطاقی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۸

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

چکیده: با توجه به رشد روز افزون تقاضای انرژی، ضرورت دارد که از منابع تجدیدپذیر انرژی استفاده بهینه‌ای گردد. استحصال انرژی به وسیله ی هاضم‌های بی‌هوازی از بیومس^۱ به عنوان یک منبع تجدیدپذیر علاوه بر تولید گاز متان^۲ روشی مناسب برای تصفیه مواد آلی فسادپذیر نیز می‌باشد که موجب کاهش شدید بار آلودگی مواد زائد آلی در بخش خانگی، کشاورزی، دامپروری و فاضلاب خواهد شد. در این پژوهش طراحی و ساخت هاضم بی‌هوازی^۳ با قابلیت استفاده از انواع مختلف زیست‌توده انجام شد. با توجه به اهمیت ساخت هاضم‌ها و نیاز به تحقیقات در محیط آزمایشگاه در این پژوهش ابتدا انواع هاضم بی‌هوازی مورد پایش قرار گرفته و مواردی که موجب بهبود سرعت و کیفیت تولید بیوگاز^۴ می‌شوند، بررسی گردید. و سپس اقدام به ساخت هاضم بی‌هوازی آزمایشگاهی کرده و با استفاده از انواع زیست‌توده به آنالیز و تحلیل خروجی‌های آن پرداخته شد. زیست‌توده‌های کود گاو شیری نژاد هلشتاین و زیست‌توده تلفیقی کود گاو شیری و اسب و همچنین تاثیرات اختلاط و غلظت زیست‌توده‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفت و همچنین تاثیرات دما، غلظت و اختلاط در هاضم در محیط ترموفیلیک^۵ میزان گاز متان تولیدی بررسی شد. نتایج حاصل شده نشان داد مواردی چون همزدن در دوره های ۴ ساعته به مدت 5 دقیقه و تلفیق کود اسب با کود گاو به نسبت ۱ به ۳ به دلیل کاهش زمان اسید زایی موجب افزایش درصد متان از ۵۸ به ۶۲

^۱ Biomass

^۲ Methane

^۳ Anaerobic digestion

^۴ Biogas

^۵ Thermophilic

درصد در بیوگاز تولیدی شد. همچنین غلظت مناسب سوبسترا^۱ در محیط ترموفیلیک بین ۷-۱۰ درصد ماده جامد می‌باشد و بیش از ده درصد ماده جامد در هضم بی‌هوازی در محیط ترموفیلیک فرایند را دچار اختلال و ورود به فاز متان‌زایی انجام نمی‌گیرد.

کلمات کلیدی: منابع تجدید پذیر انرژی ، زیست توده ، زیست گاز، هاضم بی‌هوازی، تولید گاز متان

فهرست مطالب

و	فهرست جداول
ز	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه و تاریخچه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۱-۲ انرژی های تجدید پذیر
۶	۱-۲-۱ زیست توده
۸	۱-۲-۲ تاریخچه
۱۱	۱-۲-۳ بازار جهانی زیست توده
۱۲	۱-۳ زیست انرژی
۱۶	۱-۳-۱ انواع محصول گازی زیست توده :
۱۷	۱-۳-۲ زیست گاز (بیوگاز)
۱۹	فصل ۲: هضم بی هوازی
۲۰	۲-۱ هضم بی هوازی

- ۲-۱-۱ روند هضم بی هوازی ۲۲
- ۲-۲ مزیت های تولید بیوگاز از فضولات دامی و زباله ۲۸
- ۲-۲-۱ کاهش بوی نامطبوع حاصل از فضولات دامی و زباله ۲۸
- ۲-۲-۲ جلوگیری از گرم شدن هوای کره زمین ۲۸
- ۲-۲-۳ کاهش عوامل بیماری زا ۲۸
- ۲-۲-۴ کاهش تخم علف های هرز ۲۹
- ۲-۳ انواع هاضم بی هوازی ۳۰
- ۲-۳-۱ هاضم های جریان ناپیوسته ۳۰
- ۲-۳-۲ هاضم جریان پیوسته ۳۰
- ۲-۳-۳ انواع هاضم پر کاربرد ۳۱

فصل ۳: پیشینه تحقیق ۳۷

- ۳-۱ عوامل موثر بر هضم بی هوازی ۳۸
- ۳-۱-۱ دما ۳۸
- ۳-۱-۲ PH ۴۰
- ۳-۱-۳ غلظت و آنزیم ها ۴۱
- ۳-۱-۴ اختلاط ۴۳

- ۴۴..... ۳-۱-۵ نسبت کربن به نیتروژن C/N
- ۴۵..... ۳-۱-۶ وجود مواد تسريع کننده واکنش
- ۴۶..... ۳-۱-۷ زمان ماند
- ۴۷..... ۳-۲ معرفی کار حاضر، ضرورت انجام تحقیق، نکات برجسته و نوآوری کار حاضر.
- ۴۷..... ۳-۲-۱ کار انجام شده
- ۴۸..... ۳-۲-۲ ضرورت انجام تحقیق
- ۴۹..... ۳-۲-۳ روش تحقیق
- ۴۹..... ۳-۲-۴ اهداف پژوهش
- ۴۹..... ۳-۲-۵ نوآوری

فصل ۴: طراحی وساخت هاضم بی هوازی و بررسی عملکرد هاضم ۵۱

- ۵۳..... ۴-۱ اهداف ساخت
- ۵۴..... ۴-۲ ابعاد
- ۵۵..... ۴-۳ جنس مواد و مصالح ساخت هاضم
- ۵۵..... ۴-۴ ورودی و خروجی
- ۵۶..... ۴-۵ سنسورها
- ۵۶..... ۴-۵-۱ سنسور دما

- ۴-۵-۲ سنسور فشار ۵۷
- ۴-۵-۳ PH کنترل ۵۸
- ۴-۶ کنترل دما ۵۹
- ۴-۷ اختلاط ۵۹
- ۴-۷-۱ پره ۵۹
- ۴-۷-۲ سرعت ۶۰
- ۴-۷-۳ الکترو موتور ۶۰
- انجام آزمایش و بررسی عملکرد هاضم ۶۱
- روش ثبت و محاسبه داده ها: ۶۱
- ۴-۸ تولید بیوگاز از زیست توده در شرایط ترموفیلیک ۵۵ درجه سانتی گراد ۶۲
- ۴-۸-۱ انتخاب زیست توده و شرایط هضم آن ۶۲
- ۴-۸-۲ تولید بیو گاز از زیست توده گاو شیری نژاد هلشتاین ۶۴
- ۴-۸-۳ اثر غلظت بر تولید بیو گاز از زیست توده گاو شیری ۷۰
- ۴-۸-۴ اثر تغییر دور بر تولید بیو گاز از زیست توده گاو شیری ۷۴
- ۴-۸-۵ تولید بیوگاز از زیست توده تلفیقی (کود گاو شیری و اسب) در شرایط ترموفیلیک ۷۷
- ۴-۸-۶ اعتبار سنجی ۸۴

۸۵..... ۴-۸-۷ تاثیر غلظت

۸۶..... ۴-۸-۸ تاثیر اختلاط

۸۸..... ۴-۸-۹ تاثیر تلفیق

۹۱ فصل ۵: نتیجه گیری، جمع بندی و پیشنهاد ها

۹۲..... نتیجه گیری

۹۲..... پیشنهاد ها

۹۳ پیوست ۱

۹۳ دستورالعمل راه اندازی و بهره برداری از دستگاه هاضم

۹۶ مراجع

فهرست جداول

جدول ۱-۱	موارد تشکیل دهنده بیوگاز.....	۱۸
جدول ۲-۳	مشخصات خوراک کنسانتره	۴۲
جدول ۳-۳	نسبت C/N در برخی زیست توده ها	۴۵
جدول ۱-۳	دما و زمان ماند در فرایندهای بی‌هوازی	۴۶
جدول ۱-۴	پتانسیل تولید بیوگاز در انواع کود دامی	۵۲
جدول ۲-۴	کاربرد انواع پره در مخازن	۶۰
جدول ۳-۴	مشخصات اولیه آزمایش اول (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)	۶۴
جدول ۴-۴	مشخصات اولیه آزمایش دوم (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)	۷۰
جدول ۵-۴	مشخصات اولیه آزمایش سوم (آزمایش سوم شرایط نرمال-کود گاو شیری)	۷۴
جدول ۶-۴	مشخصات اولیه آزمایش چهارم (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)	۷۸
جدول ۱-۴	پتانسیل تولید بیوگاز در انواع کود دامی	۸۴
جدول ۷-۴	تولید بیوگاز در آزمایش های انجام شده	۸۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ درصد انرژی‌های مورد استفاده در جهان ۵
- شکل ۱-۲ ظرفیت انرژی زیست توده در جهان ۵
- شکل ۱-۳ منابع زیست توده ۷
- شکل ۱-۴ نیروگاه‌های زیست توده در استان تهران ۱۰
- شکل ۱-۵ میزان تولید بیوگاز در جهان ۱۲
- شکل ۲-۱ هضم بی هوازی ۲۱
- شکل ۲-۲ فرایندهای هضم بی هوازی ۲۲
- شکل ۲-۳ مراحل هضم بی هوازی ۲۶
- شکل ۲-۴ هاضم چینی ۳۱
- شکل ۲-۵ هاضم هندی ۳۲
- شکل ۲-۶ هاضم پلاگ فلو ۳۳
- شکل ۲-۷ هاضم UBR ۳۴
- شکل ۲-۸ هاضم دو مرحله ای دارای هضم اولیه ۳۵
- شکل ۲-۹ هاضم چند مرحله ای ۳۵
- شکل ۴-۱ نوعی دستگاه هاضم بی هوازی ۵۳
- شکل ۴-۲ قسمت های مختلف هاضم ۵۶
- شکل ۴-۳ نمایشگر سنسورهای دمای آب و زیست توده ۵۷
- شکل ۴-۵ گیج فشار و شیر اطمینان ۵۸

- شکل ۴-۶ اندازه گیری PH ۵۸
- شکل ۴-۷ ترموستات و المنت حرارتی جهت کنترل دمای آب ۵۹
- شکل ۴-۸ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۵
- شکل ۴-۹ PH روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۶
- شکل ۴-۱۰ فشار روزانه مخزن در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۶
- شکل ۴-۱۱ حجم روزانه تولید گاز در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۷
- شکل ۴-۱۲ حجم تجمیعی بیوگاز در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۷
- شکل ۴-۱۳ حجم گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۸
- شکل ۴-۱۴ تصویر شعله در روز ۲۲ (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۹
- شکل ۴-۱۵ حجم تجمیعی گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری) ۶۹
- شکل ۴-۱۶ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند. (آزمایش دوم تاثیرات غلظت) ۷۰
- شکل ۴-۱۷ مقدار PH روزانه در دوره ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت) ۷۱
- شکل ۴-۱۸ مقدار فشار روزانه مخزن در دوره ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت) ۷۱
- شکل ۴-۱۹ حجم گاز تولیدشده در هر روز (آزمایش دوم تاثیرات غلظت) ۷۲
- شکل ۴-۲۰ حجم تجمیعی گاز تولید شده در زمان ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت) ۷۳
- شکل ۴-۲۱ حجم روزانه گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت) ۷۳
- شکل ۴-۲۲ حجم تجمیعی گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت) ۷۴
- شکل ۴-۲۳ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری) ... ۷۵
- شکل ۴-۲۴ PH روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری) ۷۵
- شکل ۴-۲۵ فشار روزانه مخزن در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری) ۷۶

- شکل ۴-۲۶ حجم گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری) ۷۶..
- شکل ۴-۲۷ حجم تجمیعی بیوگاز در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری) ۷۷
- شکل ۴-۲۸ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) ۷۸
- شکل ۴-۲۹ مقدار PH روزانه در دوره ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) ... ۷۹
- شکل ۴-۳۰ مقدار فشار روزانه مخزن در دوره ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) ۷۹
- شکل ۴-۳۱ حجم گاز تولید شده در هر روز (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) .. ۸۰
- شکل ۴-۳۲ حجم تجمیعی گاز تولید شده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) ۸۱
- شکل ۴-۳۳ حجم روزانه گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) ۸۱
- شکل ۴-۳۴ حجم تجمیعی گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب) ۸۲
- شکل ۴-۳۵ تصویر شعله در روز ۱۶ (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) ۸۲
- شکل ۴-۳۶ تصویر شعله در روز ۲۴ (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو شیری و اسب) ۸۳
- شکل ۴-۳۷ دستگاه هاضم ۸۳
- شکل ۴-۳۸ مقایسه PH در زمان ماند در کود گاو شیری و کود تلفیقی کود گاو شیری و اسب ۸۵
- شکل ۴-۳۹ مقایسه PH در زمان ماند در محتویات شکمبه گاو و گوسفند ۸۵
- شکل ۴-۴۱ مقایسه PH در زمان ماند در غلظت های ۹ و ۱۳ درصد مواد جامد ۸۶
- شکل ۴-۴۲ مقایسه حجم بیوگاز تولید شده در غلظت های ۹ و ۱۳ درصد مواد جامد ۸۶

شکل ۴-۴۳ مقایسه PH در زمان ماند در تعداد و زمان اختلاط کود گاو شیری ۸۷

شکل ۴-۴۴ مقایسه حجم بیوگاز تولید شده در تعداد و زمان اختلاط کود گاو شیری ۸۷

شکل ۴-۴۵ مقایسه PH در زمان ماند در کود گاو شیری و کود تلفیقی کود گاو و اسب ۸۸

شکل ۴-۴۶ مقایسه حجم بیوگاز تولید شده در کود گاو شیری و کود تلفیقی کود گاو شیری و اسب .. ۸۹

فصل 1 : مقدمه و

تاریخچه

۱-۱ مقدمه

یکی از بزرگترین چالش‌ها عدم امنیت انرژی و آلودگی محیط زیست است که بشر تاکنون در این قرن با آن روبرو بوده است. کاهش دفع دی اکسید کربن (CO_2) و گرم شدن کره زمین باعث جستجوی منابع جایگزین انرژی برای سوخت‌های فسیلی می‌شود. منابعی که بازگشت‌پذیر باشند و تولید آن مستمر باشد. این نگرش دلیلی برای روی آوردن انسان به انرژی‌های جدیدتر گردید.

در دهه‌های اخیر استفاده انسان از منابع تجدیدپذیر انرژی رو به رشد بوده است. و در نقاط مختلف جهان با توجه به اکوسیستم و جغرافیای آن مناطق و همچنین پتانسیل‌های موجود در آن از منابع متنوعی برای دست یابی به اهداف و تولید انرژی بهره مند شده است. منابعی چون باد، امواج دریا و اقیانوس‌ها، انرژی خورشید، زیست توده و زمین گرمایی. با توجه به شکل ۱-۱ علی رقم توجه و پیشرفت انسان در این زمینه تنها ۱۱ درصد انرژی مصرفی از منابع تجدید پذیر تولید می‌شود [1, 2]. و این در حالی است که رشد تکنولوژی و جمعیت جهان رو به افزایش است و پیامدهایی را نیز به همراه دارد. ازدیاد در مصارف آب و در نتیجه تولید بیشتر فاضلاب، افزایش زباله‌های انسانی و پسماندهای صنایع غذایی و کشاورزی و معضلات دفع آن‌ها نیز قابل توجه است. همچنین انسان با گسترش و پیشرفت در صنایع و تکنولوژی‌های خانگی و صنعتی وابستگی به انرژی را دو چندان کرده و نیاز به تولید، تبدیل و انتقال انرژی را بسیار افزایش داده است. و اگر در خصوص تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر استفاده نکنیم منابع موجود روزی به پایان خواهد رسید و آلودگی‌ها و صدمات وارد شده به محیط زیست که محصول مصرف سوخت‌های فسیلی است، صدمات جبران ناپذیری را به دنبال خواهد داشت [1].

با توجه به حجم زیاد پسماند تولیدی و آلودگی‌های زیست محیطی آن‌ها، ضروری است که این پسماند‌ها به روش مناسبی تصفیه شوند. هضم بی‌هوازی یکی از روش‌هایی است که برای تصفیه مواد آلی فاسد شدنی به کار می‌رود. هضم بی‌هوازی علاوه بر حذف بار آلودگی پسماند‌های آلی منبع تولید انرژی نیز می

باشد.[1-3]. استفاده از زیست توده ها به منظور تولید انرژی خصوصا از پسماند های شهری و دامی کمک شایانی در حفظ محیط زیست و بهداشت شهری و روستایی می کند. بعلاوه تولید کودهای غنی و سوخت با ارزش حرارتی بالا و در نتیجه کاهش مصرف سوخت های فسیلی از دیگر مزایای این فناوری به شمار می رود. و با توجه به بسترهای مناسب تامین زیست توده گسترش سریع این فناوری دور از انتظار نیست.

مطابق آمار ارائه شده توسط REN21 در سال ۲۰۲۰ حدود ۱۳۰۰۰۰ مگاوات نیروگاه بیوگازی وجود دارد.[1] هم اکنون از مواد زیست توده در جهان به منظور تولید انرژی از روش های ترموشیمیایی^۱ و بیوشیمیایی^۲ استفاده می شود. روش ترموشیمیایی مناسب برای مواد آلی که ظرفیت گرمایی بالایی دارند و دیرفساد می شوند و روش های بیوشیمیایی مطلوب برای مواد آلی فسادپذیر کاربرد بیشتری دارد[2]. همواره سعی و تلاش در طراحی هاضم های بی هوازی بر این بوده است که کارایی فرآیند هضم در این سیستم ها بالا رفته و کیفیت و کمیت گاز حاصله بهینه گردد و مایع خروجی از هاضم دارای حداقل بار آلودگی و میکروبی باشد. در این پژوهش طراحی و ساخت یک دستگاه بی هوازی که توانایی تولید بهینه انرژی از مواد زیست توده را دارد، مد نظر می باشد.

۱-۲ انرژی های تجدید پذیر

طبق نظر دانشمندان، منابع انرژی موجود در دنیا به دو دسته تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر تقسیم می شوند.[3] این دسته بندی بر اساس مدت زمان احیا منابع و حجم آن صورت گرفته است. از منابع تجدیدناپذیر شناخته شده تاکنون می توان سوخت های فسیلی مانند نفت، گاز، ذغال سنگ و عناصر رادیو اکتیو^۳

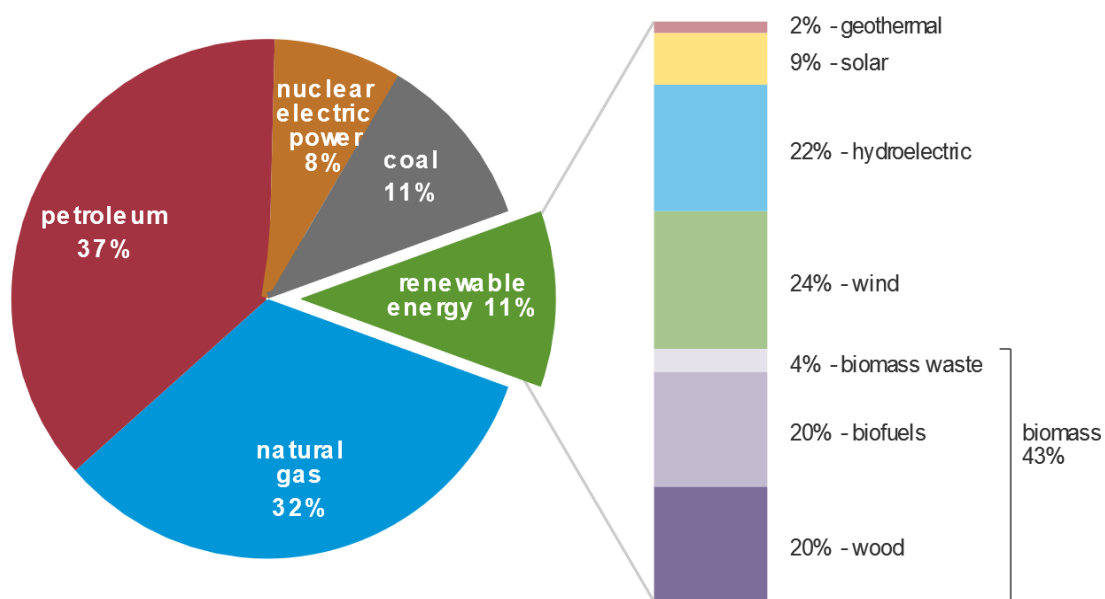
^۱ Thermochemical

^۲ Biochemical

^۳ Radioactive

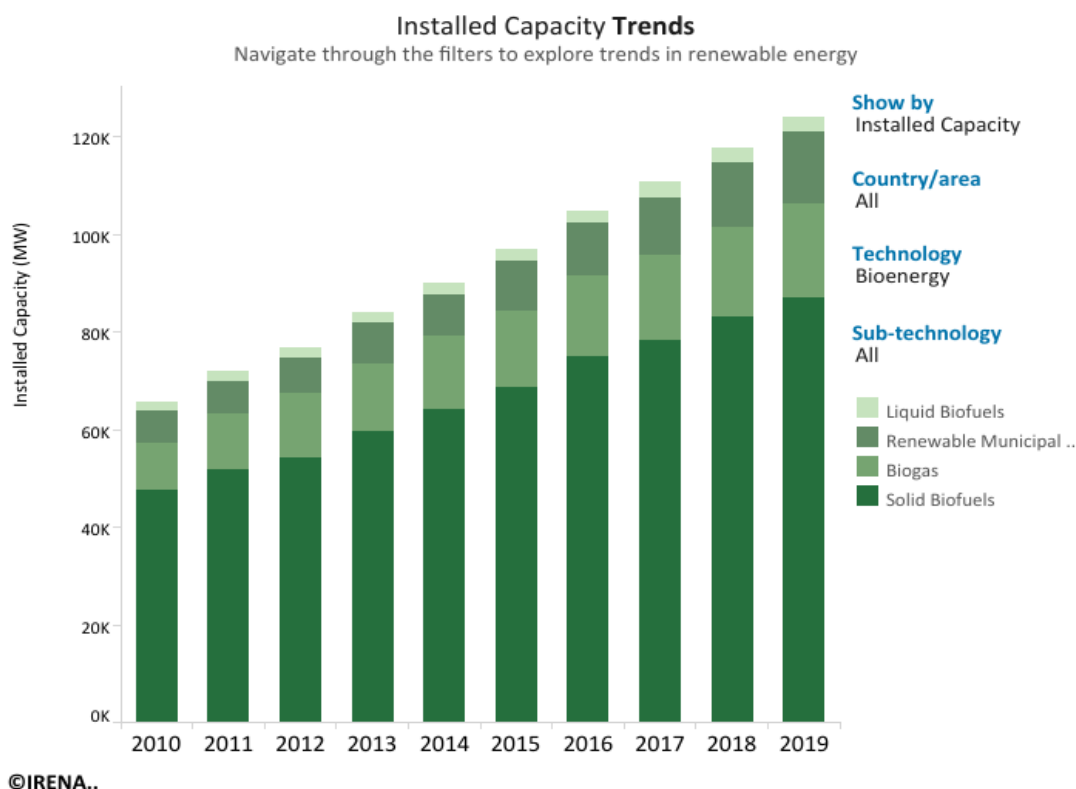
(هسته‌ای) را نام برد.[4] زیرا با استخراج از منابع مقدار آن روز به روز رو به کاهش است و مدت زمان احیا و تشکیل مجدد آن‌ها میلیون‌ها سال طول خواهد کشید. و با این اوصاف در آینده‌ای نه‌چندان دور این منابع تمام می‌شود و به عبارتی تجدیدناپذیر خواهند بود. اما منابعی مانند خورشید، زیست توده، باد و آب در چرخه‌ای مدام تولید و تبدیل می‌شوند و تجدیدپذیر هستند. انرژی تجدیدپذیر از منابعی تولید می‌شود که در مدت زمان حیات انسان کاهش نمی‌یابد و یا دوباره می‌توانند آن را دوباره پر کنند. متداول‌ترین نمونه‌ها شامل باد، خورشیدی، زمین گرمایی، زیست توده، و نیروگاه آبی است. این برخلاف منابع تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی است.

از برتری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به دائمی بودن منبع انرژی، دسترسی راحت‌تر، قیمت پایین نسبت به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی محیط زیست را برشمرد. طبق گزارشات جهانی در سال ۲۰۲۰، از ۱۱ درصد منابع انرژی تجدید پذیر مورد استفاده در جهان ۵,۵ درصد آن زیست توده می‌باشد. (شکل ۱-۱) [1,2,4] و این نشان‌گر آن است که استفاده از منابع تجدیدپذیر رشد چشم‌گیری داشته است. در این بین در برخی کشورها زیست توده‌ها از توجه خاصی برخوردار است. مطابق شکل ۱-۲ زیست توده‌ها در کره زمین دارای منابع بزرگ و پتانسیل بالایی هستند و هرجایی انسان حضور دارد این منابع در دسترس است. انسان از زیست توده به منظور تامین انرژی از گذشته‌های دور استفاده می‌کند. ساده‌ترین زیست توده‌ها چوب و بوته‌ها هستند که با سوزاندن و تبدیل انرژی زیست توده به گرما برای همه ما چهره‌ای آشنا دارد. با گذشت زمان و هوشمند شدن انسان وبا بهره‌گیری از تکنولوژی‌های تبدیل انرژی، از زیست توده‌ها صورت‌های جدید انرژی حاصل گردید.



Note: Sum of components may not equal 100% because of independent rounding.
 Source: U.S. Energy Information Administration, *Monthly Energy Review*, Table 1.3 and 10.1, April 2020, preliminary data

شکل ۱-۱ درصد انرژی‌های مورد استفاده در جهان [2]



شکل ۱-۲ ظرفیت انرژی زیست توده در جهان [4]

۱-۲-۱ زیست توده

به کلیه مواد عالی و پسماندهای آن زیست توده گفته می شود. بقایای گیاهان، پسماند و زباله های زیستی، فضولات انسان و دام، برخی گیاهان و جلبک ها که به منظور تولید انرژی کشت می شوند و... همگی زیست توده می باشند [5, 6]. زیست توده ها منابع انرژی تجدیدپذیر هستند. که از مواد زیستی به دست می آید. در مجموع موادی که سرچشمه زیستی دارند و از ازدیاد سلولی بوجود می آیند زیست توده نامیده می شوند [7,8].

تعریف اتحادیه اروپا از زیست توده که در راهنمای (EC / 2001/77) مطرح شد ، زیست توده اجزا قابل تجزیه زیستی از محصولات، پسماندها و زائدات کشاورزی (شامل مواد گیاهی و دامی)، جنگل ها و صنایع وابسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل تجزیه است. [9] براساس تعریف علمی ارائه شده برای زیست توده در این آیین نامه، زیست توده به سوخت هایی اطلاق می گردد که از جرم توده فیتوپلانکتون ها و جرم توده زئوپلانکتون ها ساخته می شوند. به طور کلی؛ هرچه که در طبیعت با منشأ زیستی به وجود آمده در پایان و تخمیر اجزای آن بایومس است. حتی انرژی حاصل از گرمای بدن. با برآوردهای انجام شده ضایعات جنگل ها و پسماندهای کشاورزی دنیا توانایی تولید حجم عظیم انرژی معادل ۷۰ میلیارد تن نفت خام حدود ۱۰ برابر انرژی مورد نیاز جهان در یک سال را دارد. استفاده از این سوخت ها به منظور تولید گرما موجب صرفه جویی اقتصادی قابل توجهی نیز خواهند شد. [4-7-8]

^۱ Phytoplankton

^۲ Geoplankton

مثالهایی از منابع زیست توده (شکل ۳-۱)

محصولات و پسماندهای کشاورزی، صنایع غذایی و باغداری

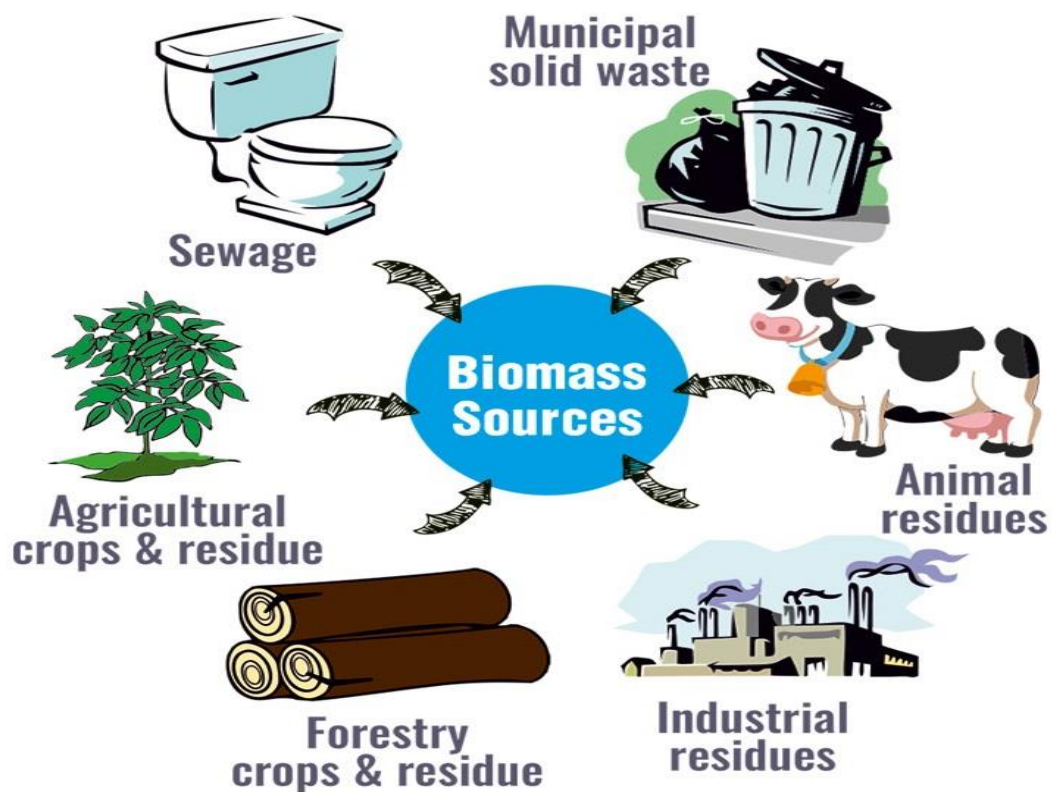
انواع فاضلاب شهری و صنعتی

جنگل ها و ضایعات جنگل

پسماند ها و فضولات دام ها

فاضلاب ها، پسماندهای آلی صنعتی

پسماند ها و زباله های انسانی



شکل ۳-۱ منابع زیست توده

۲-۱-۲ تاریخچه

در جهان استفاده از زیست توده به عنوان منبع انرژی به زمانی برخواهد گشت که آتش مهار شد و انسان‌ها از چوب و برگ و خارها برای ایجاد آتش استفاده می‌کردند. و این منابع سوخت برای آنان محسوب می‌شد، این منابع از آن زمان تا به امروز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پیشینه فن آوری تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی به قرن دهم باز می‌گردد. اولین بار در ایران و آشور به منظور گرم کردن آب حمام از این فناوری استفاده شده است. و همچنین چین اولین کشوری بود که از تصفیه پسماند های جامد به تولید بیوگاز دست یافت. [10]

پیلی نی روس خارج شدن گاز و شعله ور شدن ناقص آن را که ناشی از دفن زباله بود را از همه زودتر کشف کرد. و خارج شدن گاز و احتراق آن را نیز مشاهده کرد و اولین گزارشات را داد. اما اعلام رسمی اشتعال و شناسایی این پدیده توسط وان هلمونت در سال ۱۶۳۰ انجام شد. کاشف گاز مرداب را شرلی در سال ۱۶۶۷ می‌دانند. ولتا در سال ۱۷۷۶ توانست با اعلام متان به عنوان جزء اصلی ترکیب بیوگاز اصلی ترین و مهمترین تاریخچه علمی را از آن خود کند. وی پس از مطالعات زیاد دریافت که مقدار گاز متان تولید شده بستگی به میزان خاک و برگ پوسیده گیاهان دارد که در طبقات زیرین زمین دفن شده‌اند. وی همچنین دریافت که در صورتی که نسبت معینی از گاز متان با هوا ترکیب شود انفجار ایجاد می‌شود. اولین تجزیه شیمیایی گاز متان نیز به وسیله نامبرده صورت گرفته است. شروع تحقیقات عمده در زمینه تخمیر بی‌هوازی و کاربرد آن در کشاورزی را به شخصی به نام دیوی در سال ۱۸۰۸ نسبت داده‌اند. در سال ۱۸۸۴ فردی به نام گابن طرحی را به اجراء در آورد که با انرژی زیست توده روشنائی خیابان های شهر پاریس را تامین نمود. [10]

امروزه منابع مفید و کاربردی زیست توده تنها به چوب و برگ خشک محدود نمی‌شود و طیف وسیعی از مواد از جمله پسماندهای جامد و مایع شهری و پسماندهای صنعتی، کشاورزی و غیره را نیز در بر می‌گیرد.

در سال ۱۹۲۱، جوری لئو تحقیقاتی را انجام داد و هضم کننده بیوگاز با حجم ۸ متر مکعب را جهت هضم ضایعات آشپزخانه ساخت. وی بعداً کارخانه ای را برای رواج این فناوری افتتاح کرد و این اختراع باعث پیشرفت چین به عنوان یک بازار تجاری برای تولید بیوگاز شد. سپس، بین سالهای ۱۹۲۰ و ۱۹۵۰، هضم بی هوازی فاضلاب و زباله های کشاورزی برای تولید بیوگاز در آلمان آغاز شد. تاریخ ثبت کرده است که در سال ۱۹۷۰ و اواسط دهه ۱۹۸۰، تولید بیوگاز سریع تر در آسیا، آمریکای لاتین و کشورهای آفریقایی در مقایسه با سایر کشورها یا مناطق توسعه یافته است. چین در این توسعه تاریخی عقب نماند. کشور چین استفاده از بیوگاز را در هر منطقه روستایی در این کشور معرفی کرد و ساخت بیش از شش میلیون هضم کننده بیوگاز را از سال ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ آغاز کرد. تا پایان سال ۱۹۸۸، ۴٫۷ میلیون هضم کننده بیوگاز خانگی نصب شده است. به عنوان نتیجه افزایش هضم بی هوازی صنایع و تصفیه پسماندهای شهری، صرفه جویی در مصرف انرژی در مناطق روستایی از نیمه دوم دهه ۱۹۸۰ کند شده است. از این رو، ساخت نیروگاه های بیوگاز تا به امروز در حال افزایش سریع است. این پیشرفت باعث شده که ۲۶٫۵ میلیون هضم کننده بیوگاز حجم از ۶ به ۱۰ متر مکعب بیشتر از کاربردهای خانگی باشد که در سال ۲۰۰۷ نصب شوند. بیوگاز، موضوع یارانه دولت های ایالتی و فدرال به وجود آمد. این امر به بیش از ۳۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش نصب هضم کننده های بیوگاز از دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ کمک کرده است. گزارش شد که دولت هند در سال ۲۰۰۷ به ساخت بیش از ۴ میلیون هضم کننده بیوگاز یارانه پرداخت کرد. کاهش این یارانه این فناوری را در دسترس کاربران ضعیف و همچنین پشتیبانی مالی، آموزش و ایجاد برنامه هایی قرار می دهد که مورد غفلت قرار نگرفتند. همه این عوامل به پیشرفت سریع، نصب و استفاده از هضم کننده های بیوگاز کمک کرده اند [2,10].

در ایران محمد بن حسین عاملی معروف به شیخ بهائی (۱۰۳۱-۹۳۵ هجری قمری) جزء نخستین کسانی بود که از بیوگاز حاصل از زیست توده (فاضلاب حمام) استفاده کرد و آن را به عنوان سوخت یک حمام در اصفهان به کار برده است. اولین هاضم تولید گاز متان در ایران در روستاهای نیازآباد لرستان در

سال ۱۳۵۴ ساخته شده است. این دستگاه به گنجایش ۵ متر مکعب فضولات گاوی روستا را مورد استفاده قرار داده و بیوگاز مصرفی حمام مجاور را تأمین می نموده است. از نظر استفاده های سنتی از این منبع، مطابق سرشماری سال ۱۳۷۵، ۱۰ درصد خانوارهای روستایی برای گرمایش منازل خود و ۵ درصد خانوارهای روستایی برای پخت و پز عمدتاً از چوب و فضولات دامی استفاده می کرده اند. در سال ۱۳۵۹ دو واحد کوچک آزمایشی در دانشگاه بوعلی سینا همدان احداث گردید که با فضولات کشتارگاه و کودگاو تغذیه می گردید. دانشگاه صنعتی شریف نیز در سال ۱۳۶۱ یک واحد ۳ متر مکعب را به صورت آزمایشی مورد مطالعه قرار داد که با فضولات گاوی بارگیری می شد. [11]

تاکنون در ایران به صورت عمده تأسیسات استخراج بیوگاز از دفنگاه زباله در سه شهر به اجرا در آمده است. شیراز نخستین شهری است که این کار را به انجام رسانده است. پس از شیراز شهرهای مشهد و اصفهان نیز در این کار موفق شدند. [10] بیشترین نیروگاه های زیست توده در استان تهران واقع شده است. (شکل ۱-۴) ظرفیتی بالغ بر ۸,۹ مگاوات را شامل می شود.



شکل ۱-۴ نیروگاه های زیست توده در استان تهران

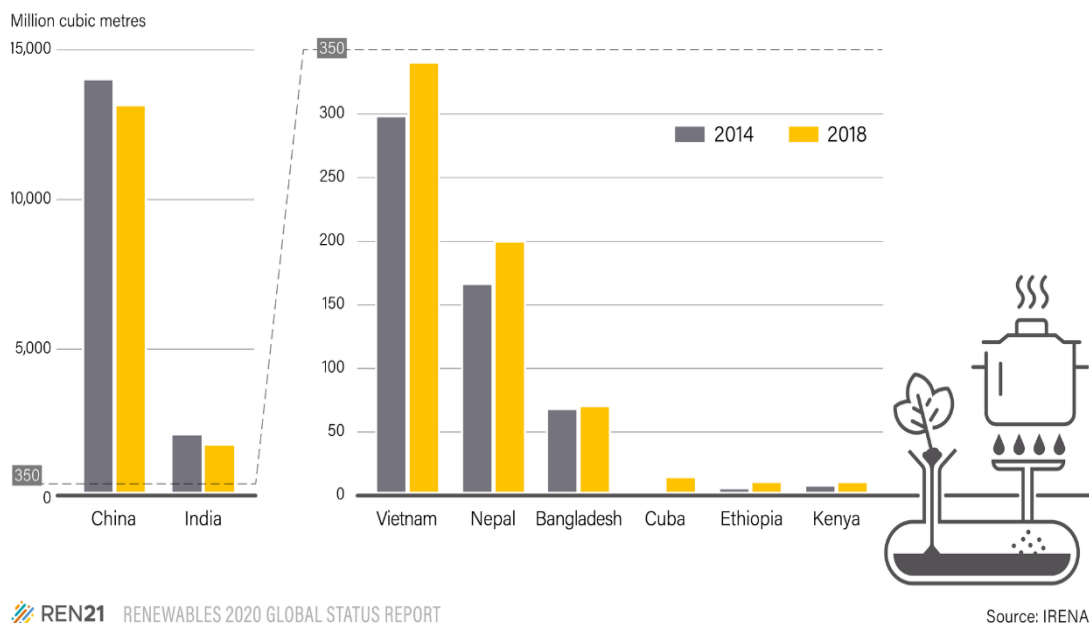
۳-۲-۱ بازار جهانی زیست توده

امروزه به دلیل نیاز به کاهش تولید گازهای گلخانه ای توجه بازار جهانی به مصرف سوخت های پاک و به ویژه زیست توده معطوف گردیده است که این امر موجب افزایش تقاضای بین المللی این منبع انرژی برای مصارفی چون حمل و نقل ، برق و حرارت گردیده است [12].

حدود 125 میلیون نفر در سراسر جهان در سال ۲۰۱۸ از بیوگاز برای پخت و پز استفاده کرده اند (آخرین اطلاعات موجود) ، بیشتر آنها در آسیا (از جمله ۱۱۱ میلیون نفر در چین و ۹ میلیون نفر در هند) در مجموع ، حدود ۱۵،۵ میلیارد متر مکعب بیوگاز برای اهداف پخت و پز در طول سال تولید شده است، به طور عمده در چین ۱۳،۱ میلیارد متر مکعب و هند ۱،۶ میلیارد متر مکعب. با این حال ، تقاضا برای بیوگاز برای پخت و پز در این دو بازار مسلط بین ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ کاهش یافته است، در حالی که در سایر کشورهای آسیایی مانند بنگلادش، نپال و ویتنام افزایش یافته است. هایوس و انرژی از طریق برنامه های مربوطه خود در کامبوج و اندونزی حدود ۱۲۰،۰۰۰ هضم کننده بیوگاز را توزیع کردند [2]. مطابق شکل ۱-۵ بیشترین مصرف بیوگاز نیز در چین و هند می باشد به عنوان نمونه آلمان ۶۵ درصد بازار این سوخت در اروپا را به خود اختصاص داده است. در بخش سوخت های زیستی آمریکای شمالی بیشترین مصرف کننده بایواتانول در صنعت حمل و نقل بوده و اروپا و آمریکای لاتین بیشترین مصرف کننده بایودیزل در این صنعت به شمار می روند [1].

تولید بیوگاز در آفریقا طی سالهای ۲۰۱۴-۲۰۱۸ تقریباً ۴۰٪ افزایش یافته و به حدود ۴۶ میلیون مترمکعب رسیده است ، که عمدتاً در پنج کشور درگیر در برنامه مشارکت بیوگاز آفریقا است: بورکینافاسو ، اتیوپی ، کنیا ، تانزانیا و اوگاندا. در دو مرحله اول این برنامه ، حدود ۷۰،۰۰۰ هضم کننده بیوگاز در سراسر آفریقای شرقی نصب شده است ، که راه حل های پخت و پز تمیز را برای ۵۰۰۰۰۰ نفر فراهم می کند. [1]

Production of Biogas for Cooking in Selected Countries, 2014 and 2018



REN21 RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT

شکل ۱-۵ میزان تولید بیوگاز در جهان [1]

۱-۳ زیست انرژی

زیست انرژی یا انرژی زیستی یا بیو انرژی: انرژی است که از منابع زیستی بدست می آید. این مفهوم رابطه نزدیکی با مفهوم زیست توده دارد. زیست توده به سوختی گفته می شود که از منابع زیستی بدست می آید، زیست انرژی، انرژی بدست آمده از زیست توده است در حالی که زیست توده در اینجا نوعی سوخت و زیست انرژی نوعی انرژی است.

استفاده از انرژی زیستی در دو دسته اصلی قرار دارد: "سنتی" و "مدرن". استفاده سنتی به احتراق زیست توده به اشکال چوب، ضایعات حیوانات و ذغال سنگ سنتی اشاره دارد. فن آوری های بیولوژیکی مدرن شامل سوخت های زیستی مایع است. پالایشگاه های زیستی، بیوگاز تولید شده از طریق هضم بی هوازی پسماندها، سیستم های گرمایش گلوله های چوبی، و فن آوری های دیگر نیز از دسته های مدرن

استفاده از زیست انرژی می‌باشد. در حدود یک دوم از انرژی تجدید پذیر در جهان شامل زیست فناوری است که بیش از نیمی از آن شامل استفاده از زیست توده سنتی است. زیست انرژی حدود ۱۰٪ از کل مصرف انرژی نهایی و ۱,۴٪ تولید برق جهانی در سال ۲۰۱۵ را به خود اختصاص داده است [1,4]. زیست توده پتانسیل قابل توجهی برای تقویت منابع انرژی در کشورهای پرجمعیت با افزایش تقاضا، مانند برزیل، هند و چین دارد. می‌توان آن را مستقیماً برای گرم کردن یا تولید برق سوزاند یا می‌توان آن را به جایگزین‌های نفت یا گاز تبدیل کرد. سوخت‌های زیستی مایع، یک جایگزین قابل تجدیدپذیر برای بنزین، بیشتر در بخش حمل و نقل استفاده می‌شوند [13]. برزیل پیشرو در سوخت‌های زیستی مایع است و بزرگترین ناوگان وسایل نقلیه با سوخت انعطاف پذیر را دارد، که می‌تواند روی بیواتانول کار کند. الکلی که بیشتر از طریق تخمیر کربوهیدرات‌ها در محصولات شکر یا نشاسته مانند ذرت، نیشکر ساخته می‌شود. [1].

در تبدیل زیست توده به انرژی زیست توده جامد، مانند چوب و زباله، می‌تواند مستقیماً سوزانده شود تا گرما ایجاد شود. زیست توده همچنین می‌تواند به گازی به نام بیوگاز یا به سوخت‌های زیستی مایع مانند اتانول^۱ و بیودیزل^۲ تبدیل شود. این سوخت‌ها پس از آن می‌توانند برای انرژی سوخته شوند.

بیوگاز هنگامی تشکیل می‌شود که کاغذ، ضایعات مواد غذایی و زباله‌های حیاط در محل‌های دفن زباله تجزیه شوند و با پردازش فاضلاب و کود حیوانی در مخازن ویژه‌ای به نام هضم کننده تولید می‌شود. **اتانول** از محصولاتی مانند ذرت و نیشکر ساخته شده است که برای تولید سوخت اتانول برای استفاده در وسایل نقلیه تخمیر می‌شوند. بیودیزل از روغنهای گیاهی و چربی‌های حیوانی تولید می‌شود و در وسایل نقلیه و همچنین به عنوان روغن گرمایش قابل استفاده است [4,6].

^۱ Ethanol

^۲ Biodiesel

برای تولید انرژی از زیست توده ، از اصطلاح مواد اولیه استفاده می شود تا به هر نوع مواد آلی برای تولید نوعی انرژی استفاده شود .سپس مواد اولیه باید از طریق بسیاری فرایند به شکل انرژی قابل استفاده تبدیل شوند.

مواد اولیه + فرآیند ➡ فرم انرژی قابل استفاده

برخی از فرآیندهای تبدیل زیست توده متداول عبارتند از:

احتراق: فرآیندی که توسط آن مواد قابل اشتعال در حضور هوا یا اکسیژن سوزانده می شوند تا گرما آزاد شوند. این ساده ترین روشی است که با استفاده از آن می توان زیست توده برای انرژی استفاده کرد. در فرم ابتدایی آن ، احتراق برای گرم کردن فضا (به عنوان مثال آتش برای گرما) استفاده می شود اما می تواند برای گرم کردن بخار برای تولید برق نیز مورد استفاده قرار گیرد.[14]

گاز زدایی: تبدیل زیست توده به مخلوط گاز قابل احتراق است که به آن گاز سازنده ($\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$) یا سینگاز گفته می شود. فرآیند گازرسانی از گرما ، فشار و احتراق جزئی برای ایجاد سینگاز استفاده می کند، که می تواند به جای گاز طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.[15]

پیرولیز^۲: تجزیه حرارتی در صورت عدم وجود اکسیژن پیرولیز است. این پیش ماده گاززدایی است و به عنوان بخشی از گاز و احتراق صورت می گیرد. محصولات تولید گازهای گلخانه ای شامل گاز ، مایع و یک کاراکتر فروخته شده با نسبت هر یک به پارامترهای فرایند بستگی دارد.

هضم بی هوازی: فرایندی است که باکتریها در صورت عدم وجود مواد آلی در صورت عدم وجود هوا تجزیه می شوند و بیوگاز حاوی متان و یک مانده جامد را به همراه می آورند. سپس متان می تواند برای تولید انرژی ذخیره شود. به طور مشابه ، باقی مانده جامد نیز می تواند برای تولید انرژی سوزانده شود.

^۱ syngas

^۲ Pyrolysis

تخمیر: شامل تبدیل گلوکز (یا کربوهیدرات) گیاه به الکل یا اسید است. مخمر یا باکتری به مواد زیست توده اضافه می شود ، که برای تولید اتانول (الکل) و دی اکسید کربن از قندها تغذیه می کنند. اتانول برای دستیابی به غلظت بالاتر الکل برای دستیابی به خلوص مورد نیاز برای استفاده به عنوان سوخت خودرو مقطر و کم آب می شود. باقیمانده جامد حاصل از فرآیند تخمیر می تواند به عنوان خوراک دام استفاده شود و در صورت نیشکر می توان به عنوان سوخت دیگهای بخار یا برای گاززدایی بعدی استفاده کرد. برخی از منابع اولیه برای برخی از فرآیندهای تبدیل زیست توده نسبت به سایرین مفید هستند. تعیین اینکه از منابع اولیه و فرآیندهای مورد استفاده استفاده شود ، تا حد زیادی با در دسترس بودن منابع و شکل نهایی انرژی مورد نظر تعیین می شود.

قبل از انقلاب صنعتی، زیست توده منبع اصلی انرژی بود. زیست توده اکنون درصد کمی از کل مصرف انرژی جهان را تشکیل می دهد. با این حال ، برای تقریباً ۲,۵ میلیارد نفر ، این منبع اصلی انرژی برای پخت و پز و گرم کردن است [15]. استفاده از زیست توده با منطقه ای که در آن استفاده می شود بسیار متناقض است. دسترسی به منابع ، در دسترس بودن فناوری و قابلیت استفاده اقتصادی همه محرک استفاده از زیست توده است .

برخی از حوزه های قضایی (به ویژه آنهایی که ابتکارات جنگلداری پایدار دارند) زیست توده را منبع انرژی "خنثی کربن" اعلام کرده اند. این استدلال بر این منطق است که انتشار کربن حاصل از زیست توده سوزان توسط گیاهانی که برای تغذیه راکتورهای زیست توده در آینده رشد می کنند در آینده جذب می شوند ، بنابراین چرخه کربن را برای گیاه تشکیل می دهند.[16]

منافع و هزینه های زیست محیطی بسته به تکنولوژی و خوراک اولیه استفاده شده بسیار محتاط است. در حالی که برخی از فرآیندهای زیست توده مانند زباله به انرژی برای انتشار CO2 پایین تر مورد حمایت قرار می گیرند ، برخی از فرآیندهای مانند احتراق ، دی اکسید کربن را آزاد می کنند و ذرات آن را نگران

کننده می دانند. اقلیت ها و مناطق فقیر انرژی در جهان هنوز برای اکثر نیازهای انرژی خود به زیست توده اتکا می کنند [15,16].

زیست توده منبع تقریباً ۱٪ از کل تولید برق ایالات متحده در سال ۲۰۱۹ بود. زیست توده مستقیماً در نیروگاه های بخار برقی سوزانده می شود ، یا می تواند به گازی تبدیل شود که می تواند در ژنراتورهای بخار، توربین های گازی یا موتورهای سازنده احتراق داخلی سوزانده شود [1].

۱-۳-۱ انواع محصول گازی زیست توده :

بیوگاز: ترکیبی از دی اکسید کربن (CO_2) و هیدروکربن ها ، در درجه اول گاز متان (CH_4) ، از تجزیه بیولوژیکی مواد آلی است.

سینگاز : مخلوطی از گاز که در درجه اول از هیدروژن (H_2) و مونواکسید کربن (CO) تشکیل می شود و هیدروکربن ها از تجزیه ترمو شیمیایی مواد آلی یا معدنی تشکیل می شوند.

بیوگاز مرکب : زیست گاز با ارزش حرارتی متوسط که از برخی آلودگی های کمیاب و آب جدا شده است ، اما ترکیب نسبی دی اکسید کربن (CO_2) و متان (CH_4) را حفظ می کند.

بیومتان^۱ : گاز مشتق از بیوگاز ، با فشار و ارزش حرارتی بالا که عمدتاً متان از بیوگاز پالایش می شود که در آن بیشتر آلاینده ها ، دی اکسید کربن (CO_2) و نیتروژن (N_2) موجود در بیوگاز حذف می شود.

گاز طبیعی مایع تجدید پذیر RNG (R-LNG): که به شکل مایع تبدیل می شود ، اغلب برای استفاده به عنوان سوخت حمل و نقل مورد استفاده است.

^۱ Biogas Conditioned

^۲ Biomethane

^۳ Renewable liquid natural gas

گاز طبیعی فشرده شده قابل تجدیدپذیر (R-CNG):^۱ که تحت فشار زیاد فشرده می‌شود،

اغلب برای استفاده به عنوان سوخت حمل و نقل کاربرد دارد [16,17].

۲-۳-۱ زیست گاز (بیوگاز)

زیست گاز چیست؟

زیست گاز یا گازمرداب مخلوطی است از گاز متان و دی اکسیدکربن که در اثر تخمیر مواد آلی در دمای معین و PH مناسب در محیط بی هوازی که توسط میکروب ها تولید می‌شود. و نوعی زیست انرژی است. بیوگاز حدود 60 الی 70 درصد گاز متان حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد دی اکسیدکربن و مقادیر ناچیز ، هیدروژن سولفید، نیتروژن و هیدروژن دارا می‌باشد [18-20]. این گاز به صورت طبیعی در پساب ها و مرداب ها مشاهده می شود .با استفاده ازمدفوع دام و انسان به همراه پسماند گیاهان و چربی ها، زیست گاز تولید می شود و به عنوان سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیوگاز از طریق زیست توده از طریق فرآیند تجزیه بی‌هوازی تولید می‌شود. باکتری‌های بی‌هوازی – باکتری‌هایی که بدون حضور اکسیژن آزاد زندگی می‌کنند - به طور طبیعی در خاک ها ، در بدن‌های آبی مانند باتلاق‌ها و دریاچه ها و در دستگاه های گوارشی انسان و حیوانات رخ می‌دهد. این باکتری‌ها می‌خورند و تجزیه می‌شوند ، یا زیست توده را هضم می‌کنند و بیوگاز تولید می‌کنند. بیوگاز بیشتر از متان و دی اکسیدکربن تشکیل شده است. متان (CH_4) همان ترکیب غنی از انرژی است که در گاز طبیعی یافت می‌شود. در ترکیب بیوگاز از ۴۰٪ - ۶۰٪ متان تا ۶۰٪ - ۴۰٪ دی اکسیدکربن (CO_2) ، با مقادیر کمی از بخار آب و سایر گازها متفاوت است [19-20]. ترکیبات بیوگاز در جدول ۱-۱ آورده شده است.

^۱ Renewable compressed natural gas

جدول ۱-۱ موارد تشکیل دهنده بیوگاز [۱۹]

Component	%
Methane(CH_4)	50-75
Carbon dioxide(CO_2)	24-45
Water vapour(H_2O)	2-4
Nitrogen(N_2)	<2
Oxygen(O_2)	<2
Others :Ammonia (NH_3),hydrogen(H_2),hydrogen sulphide(H_2S),trace gas	<1

فصل 2

مضمون بی ہوازی

۲-۱ هضم بی‌هوازی

بیوهضم یا هضم بی‌هوازی (AD) یک فرایند بیولوژیکی است که هنگامی اتفاق می‌افتد که مواد آلی در غیاب اکسیژن توسط باکتری‌ها تجزیه شوند (یعنی بی‌هوازی). با تجزیه باکتری‌ها مواد آلی، بیوگاز آزاد و ذخیره می‌شود. بیوگاز تقریباً ۶۰٪ متان و ۴۰٪ دی‌اکسید کربن تشکیل شده است. محصول فرعی باقیمانده هضم^۱ نامیده می‌شود و دارای بوی کم و مواد مغذی بسیار است [21].

بیوگاز را می‌توان برای تأمین گرما، برق یا هر دو مورد احتراق قرار داد. از طرف دیگر، بیوگاز را می‌توان با از بین بردن سایر گازها، به متان خالص، که اغلب به آن بیومتان گفته می‌شود، ارتقا داد. این جریان خالص بیومتان می‌تواند به عنوان جایگزین گاز طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. ماده باقی مانده در فرآیند هضم بی‌هوازی حاوی مواد مغذی ارزشمند گیاه مانند نیتروژن و پتاسیم است. هضم را می‌توان به عنوان کود و نرم کننده خاک استفاده کرد [22]. در شکل ۱-۲ شماتیکی از تولید انرژی و بهره برداری از آن دیده می‌شود.

دو فرآیند هضم بی‌هوازی اساسی وجود دارد که در محدوده دمای مختلفی اتفاق می‌افتد:

هضم مزوفیلیک^۲: رایج ترین فرآیند برای هضم بی‌هوازی است. این دما بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد

صورت می‌گیرد و می‌تواند یک یا دو ماه طول بکشد، بیوگاز کمتری تولید می‌کند و به بهداشت بیشتری

نیاز دارد. [23,24].

^۱ Digestate

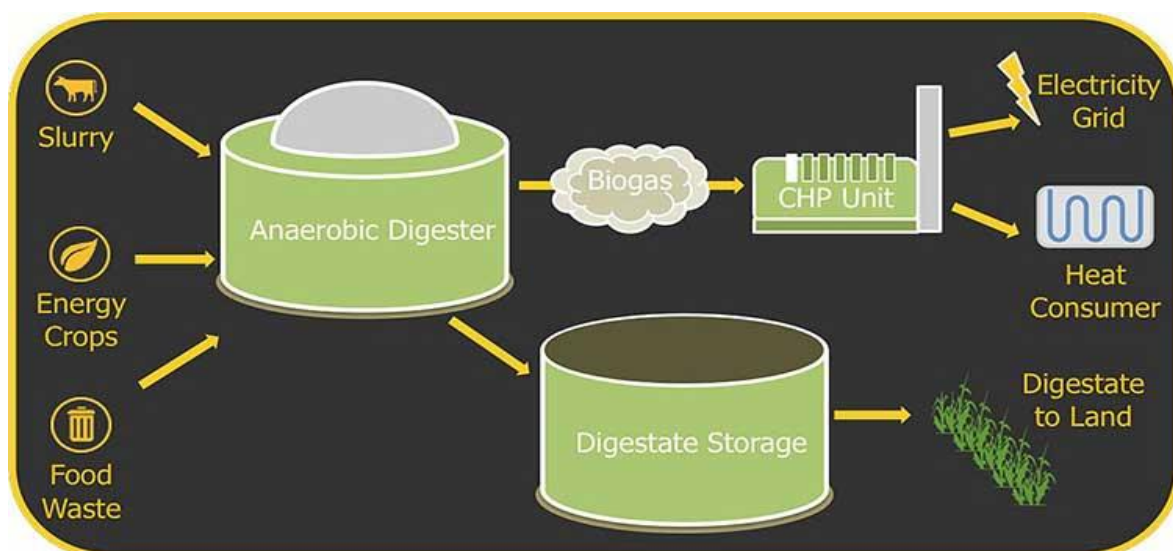
^۲ Mesophilic

هضم ترموفیلیک: فناوری کمتر و گران‌تر است. به طور معمول از دمای ۵۰-۶۵ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد، برای حفظ دمای کار بالاتر به انرژی اضافی نیاز دارد. این ماده بیوگاز بیشتری را در دوره کوتاه‌تر و سریع‌تر تولید می‌کند اما باکتری‌ها حساس‌تر هستند [23-24]

هضم بی‌هوازی دارای یک جریان فرآیند تعریف شده است که از سه مرحله مجزا تشکیل شده است. **پیش تیمار:** در پیش تیمار، مواد زائد ممکن است پردازش، تفکیک یا مخلوط شوند تا از تجزیه آنها در هضم غذا اطمینان حاصل شود.

هضم: هنگام هضم، مواد زائد توسط باکتری‌ها تجزیه می‌شوند و بیوگاز تولید و جمع‌آوری می‌شود. **پردازش بیوگاز:** بیوگاز تولید شده یا به صورت احتراق مصرف می‌شود یا خالص‌تر شده و به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی به کار می‌رود. برای پردازش بیوگاز از اسکرابر، فیلترها یا وسایل دیگر برای از بین بردن ناخالصی‌ها و دی‌اکسیدکربن (CO₂) استفاده می‌شود.

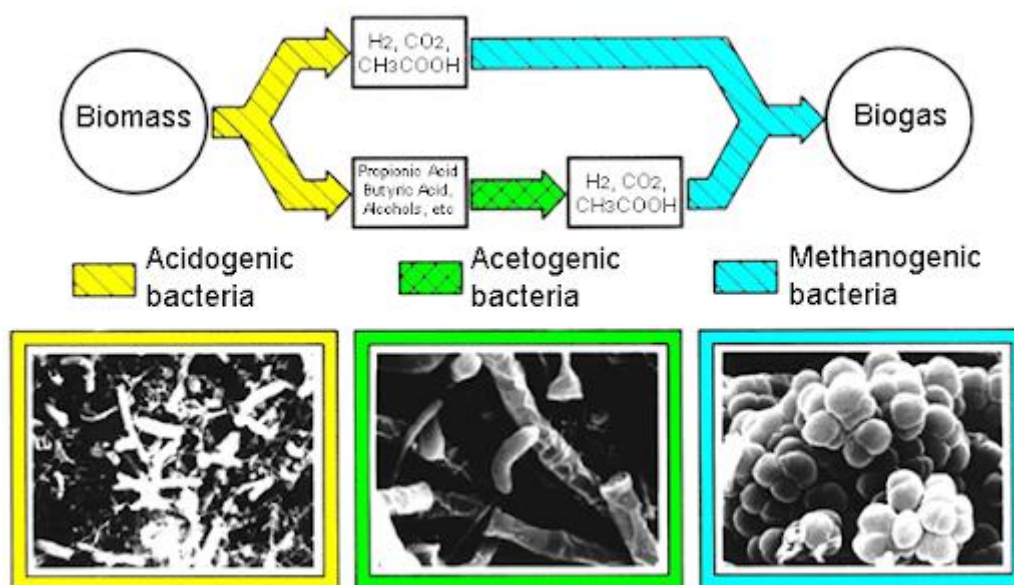
استفاده مجدد یا دفع زباله‌های هضم شده جامد: ضایعات هضم شده دارای ماده مغذی بالایی هستند و تا زمانی که عاری از پاتوژن‌ها یا سموم نباشند، می‌توانند به عنوان کود مورد استفاده قرار گیرند، یا می‌توان برای تقویت بیشتر مواد مغذی به صورت کمپوست درآیند. [25]



شکل ۱-۲ هضم بی‌هوازی [6]

۲-۱-۱ روند هضم بی هوازی

شامل چهار مرحله هیدرولیز، اسیدوژنز^۲، استئوژنز^۳ و متانیزاسیون^۴ است. [26-27] این چهار مرحله هضم بی هوازی ضروری است زیرا فرایندهای کلی در جایی که مواد آلی از طریق میکروارگانیسم‌های بی هوازی در حال تجزیه و تغییر و واکنش شیمیایی هستند را نشان می‌دهد. (شکل ۲-۲)



شکل ۲-۲ فرایندهای هضم بی هوازی

Hydrolysis ^۱

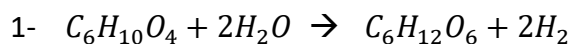
Acidogenesis ^۲

Osteogenesis ^۳

Methanization ^۴

۱-۱-۲ فرآیند هیدرولیز

هیدرولیز آغاز فناوری هضم بی هوازی است. در طی این فرآیند، ترکیبات نامحلول آلی به ترکیبات محلول در آلی پردازش می‌شوند. [29] برخی از نمونه‌های ترکیبات غیر محلول آلی، پروتئین، چربی‌ها، لیپیدها و کربوهیدرات‌ها هستند در حالی که ترکیبات محلول در آلی شامل اسیدهای آمینه، اسید چرب و سایر ترکیبات است. قندهای ساده مواد آلی نامحلول تحت تأثیر برخی واکنش‌ها قرار می‌گیرند و باعث تشکیل ترکیباتی می‌شوند که به انتقال از طریق سلول‌های میکروبی کمک می‌کنند. معادله (۱) واکنش هیدرولیز را نشان می‌دهد که مواد آلی به گلوکز تبدیل می‌شوند بعد به صورت بیوشیمیایی به دی‌اکسیدکربن و متان هضم می‌شوند.



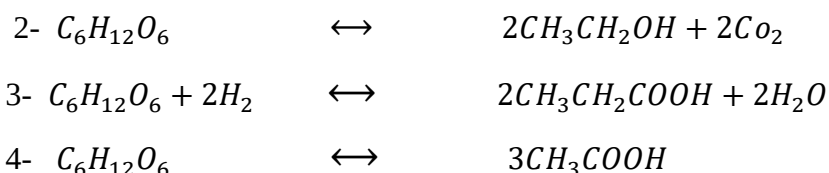
فرآیند هیدرولیز به عوامل زیر بستگی دارد، یعنی: اندازه مواد و شکل، سطح، تجمع زیست توده، تولید آنزیم و جذب. [30-31]

۱-۱-۲ فرآیند اسیدوژنز یا اسیدزایی

این مرحله دوم هضم بی هوازی است که به آن فرآیند تخمیر نیز گفته می‌شود. میکروارگانیسم‌ها و مواد آلی که حدود ۳۰٪ از آنها به الکل یا زنجیره کوتاه اسیدهای چرب تبدیل می‌شوند [32] در حالت پایدار، بیشتر مواد آلی به لایه‌های موجود و در دسترس تبدیل می‌شوند. تقریباً کمتر از ۵۰٪ از بستر به الکل‌ها یا اسیدهای چرب زنجیره کوتاه تبدیل می‌شود، در نتیجه باعث حذف مواد آلی تجزیه پذیر می‌شود. [33] ترکیبات محلول که در طی فرآیند هیدرولیز تشکیل می‌شوند، بیشتر کاهش می‌یابند و در نتیجه دی‌اکسیدکربن (CO₂)، هیدروژن (H₂)، اسیدهای آلی، الکل‌ها و برخی ترکیبات آلی گوگرد تشکیل می‌شوند [32]. در فرآیند اسیدوژنز، اسید استیک به دلیل استفاده از آن به عنوان ماده‌ای برای تشکیل

ارگانسیم‌های متان ، به عنوان اصلی‌ترین اسید آلی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به رفتار PH به فرآیند اسیدوژنز، PH بیشتر از ۵ باعث افزایش تولید اسیدهای چرب فرار (VFA) و PH پایین (کمتر از ۵) منجر به تولید اتانول بیشتر می‌شود. در PH کمتر از ۴ طبق مطالعات چاسنیک و همکاران ، ممکن است واکنش‌ها متوقف می‌گردد. [34,35]

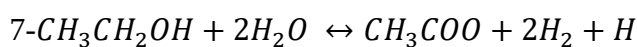
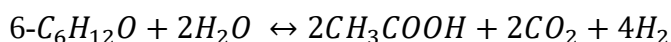
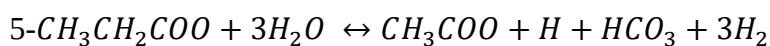
معادله (۲) واکنش‌های گلوکز با اتانول را نشان می‌دهد. از واکنش‌های زیر، گلوکز نیز در معادله (۳) به پروپیونات تبدیل می‌شود در حالی که در معادله (۴) ، گلوکز به اسیدهای استیک تبدیل خواهد شد. از این رو ، گلوکز به عنوان محصول اصلی شناخته شده است.



۳-۱-۱-۲ فرآیند استئوژنز

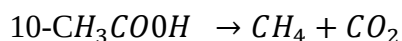
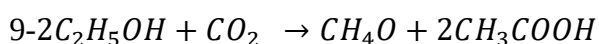
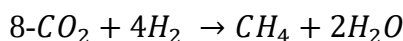
در مرحله سوم هضم بی هوازی ، هیدروژن نقش حیاتی دارد. این واکنش زمانی اتفاق می‌افتد که فشار جزئی هیدروژن در نتیجه تشکیل اسید از طریق فرآیند ترمودینامیک به اندازه کافی کوچک باشد. این روند کاهش فشار جزئی در نتیجه باکتری‌های مهار کننده هیدروژن است. [36] گفته می‌شود روند استئوژنز به طور مشابه با آخرین مرحله هضم بی هوازی معروف به متانوژنز مرتبط است. این امر باعث از دست رفتن الکترون‌های اسیدهای چرب فرار و همچنین الکل برای تشکیل استات ، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن قبل از تبدیل نهایی به متان می‌شود. به گفته استرلینگ و همکاران، [37] هیدروژن تولید کننده باکتری‌های استوژنیک نیز از واکنش اسیدهای چرب و الکل استات، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند. باکتری‌های همو استوژنیک استات را از دی‌اکسیدکربن و هیدروژن تولید می‌کنند. [37] استات همچنین باکتری‌های استوژنیک تولید کننده هیدروژن را تولید و تشکیل می‌دهد. [33] شروع لایه ها منجر به تعداد

محصولات نهایی از مرحله اسیدی شدن می‌شود. نمونه این محصولات شامل اسیدهای پروپیونیک ، بسترهای پلیمری ، اسیدهای چرب زنجیره ای و اسیدهای بوتیریک است. مخلوط اسیدهای لاکتیک ، الکل ها و گلیسرول در تبدیل زیرلایه ها توسط میکروارگانیسم های استوژنیک به اسید استیک ، هیدروژن و دی اکسید کربن کمک می‌کند. [38] برخی از نمونه های واکنش های استوژنز در معادلات (۵) تا (۷) نشان داده شده است.



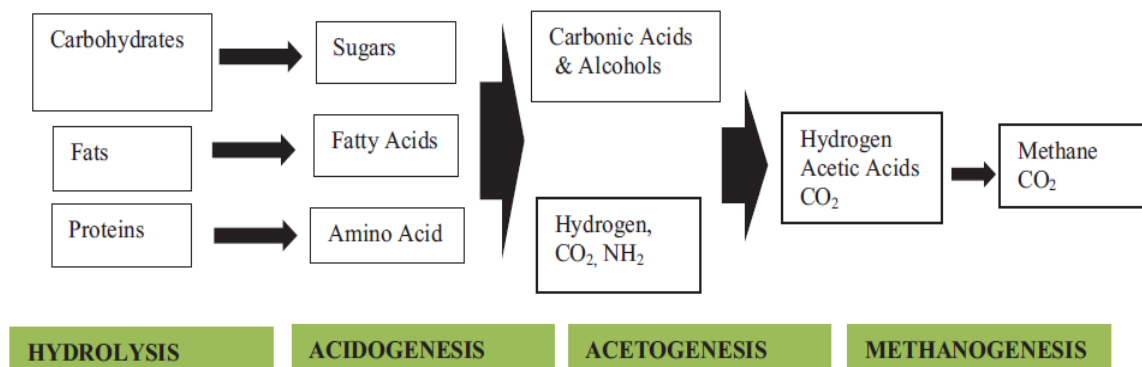
۴-۱-۱-۲ فرآیند متانیزاسیون یا متان زایی

متانوژنز به عنوان فرآیند پایان روند هضم بی هوازی شناخته شده است. در طی این فرآیند ، واکنش بین هیدروژن و اسید استیک متان و دی‌اکسیدکربن ایجاد می‌کند. این کندترین مرحله در فرآیند هضم بی هوازی است و توسط برخی از پارامترهای عملیاتی مانند دما ، PH ، میزان بارگذاری آلی و بستر مختل می‌شود. [39,40] در بیشتر هضم کننده های بیوگاز ، کمتر از ۳۰٪ از متان از کاهش دی‌اکسیدکربن توسط متانوژن‌های هیدروژنی تروفیک ناشی می‌شود، در حالی که ۲-۲٪ باقیمانده متان توسط متانوژن‌های تروفیک متیل تولید می‌شود. [32] متانوژن ها دارای یک طیف بستر باریک هستند و به وجود اکسیژن حساس هستند. فرآیند تولید متان به عنوان متانیزاسیون واکنش‌های نشان داده شده در معادلات (۸) تا (۱۰) روند متانیزاسیون را توصیف می‌کنند.



معادلات (۸) تا (۱۰) روند واکنشهایی را نشان می‌دهد که متان و دی‌اکسیدکربن را به عنوان محصولات نهایی تولید می‌کند. با توجه به واکنش‌های شیمیایی ، محصولات در آغاز فرآیند هضم تشکیل می‌شوند.

شکل ۲-۳ مراحل تخریب روند هضم بی هوازی را نشان می‌دهد. با بحث در مورد چهار مرحله اصلی هضم بی هوازی که در شکل ۲ مشاهده شده است، یافته‌ها نشان داد که هر مرحله از فرآیند هضم بی هوازی توسط میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود، که به حفظ سرعت واکنش تعادل برای اطمینان از هضم سریع و پایدار کمک می‌کند. با سرعت واکنش تعادل، واکنش‌های مصرف‌کننده اسید و هیدروژن به طور بالقوه سریع‌تر از مرحله تولید اسید و هیدروژن هستند (مراحل هضم بی هوازی). همانطور که از چهار مرحله واکنش هضم بی هوازی دیده می‌شود، اسید و هیدروژن درگیر هستند. این فرآیند، تمایل به کاهش PH هضم غذا دارد و باعث توقف یا کاهش متانوژنز می‌شود. [41,42] شکل ۲-۳ مراحل هضم بی هوازی را به ترتیب نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ مراحل هضم بی هوازی [43]

هضم بی هوازی یک فناوری اثبات شده است که می‌تواند در انواع جریان زباله اعمال شود. این چندین اثر مثبت دارد. از دیدگاه محیطی، هضم بی هوازی میزان زباله‌های موجود در محل‌های دفن زباله را کاهش می‌دهد و انتشار متان و دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، فرایند هضم بی هوازی باعث حذف عوامل بیماری‌زا، فسفر و فلزات می‌شود که در غیر این صورت می‌توانند منابع آب را آلوده کنند. از

دیدگاه اقتصادی ، این فناوری منبع انرژی را تبدیل کرده و کود ارزشمندی را ایجاد می کند.[44]

مهمترین چالش پیش روی هضم بی هوازی ، قیمت این فناوری است. با وجود این چالش ، هضم بی هوازی در کشورهای در حال توسعه به سرعت در حال گسترش است و شاهد رشد متوسط در کشورهای توسعه یافته هستیم.

در فرایند هضم بی هوازی به ازاء تبدیل هر کیلوگرم ماده جامد، حدود ۰,۳۵ - ۰,۲۵ متر مکعب گاز متان معادل 12×10^6 (۳۰۲۵۹۸۷ کیلوکالری) انرژی تولید می شود. که برای تامین حرارت ها یا تولید الکتریسیته قابل استفاده می باشد.[45] فرایند های بیهوازی به جهت سازگاری با محیط زیست و به عنوان یک فناوری پایدار در اولویت قرار گرفته است. [46]

در میان فناوری های موجود جهت تبدیل ضایعات به انرژی زیستی ، فرایند های هضم بی هوازی به دلیل سازگاری با محیط زیست و به عنوان یک فناوری پایدار در اولویت قرار گرفته است . استفاده از هضم های بی هوازی نه تنها به تبدیل زائدات آلی به محصولات مفید نظیر گاز متان و کود زیستی منجر می شود، بلکه از نظر زیست محیطی نیز به توسعه پایدار کمک می کند. چون از آلودگی احتمالی آب های زیر زمینی و هوا در اثر دفن زائدات آلی جلوگیری کرده و به استفاده بهینه تر از اراضی و حاصل خیزی آن منجر می شود[47].

به طور معمول ۴۰-۶۰ درصد از مواد آلی موجود در ضایعات به بیوگاز و باقی مانده (لجن) که حاوی جامدات بیولوژیکی تثبیت شده بی ضرر می باشد، به عنوان بهبود دهنده خاک مورد استفاده قرار می گیرد. کود تشکیل شده در فرایند هضم بی هوازی از نظر ترکیبات موجود دارای مزیت های بسیاری نسبت به کودهای شیمیایی و کودهای طبیعی است، و از نظر بهداشتی هم به دلیل نداشتن مواد بیماری زا اولویت دارد. حفظ مواد معدنی مثل نیتروژن و فسفر موجود در ضایعات ، پس از اتمام فرایند در لجن خروجی از هاضم باقی می ماند که پس از تصفیه ی جزئی، به عنوان کود مناسب زمین های کشاورزی قابل استفاده اند.[47,48]

۲-۲ مزیت های تولید بیوگاز از فضولات دامی و زباله

۲-۲-۱ کاهش بوی نامطبوع حاصل از فضولات دامی و زباله

کنترل بوی نامطبوع حاصل از زباله ها و فضولات دامی ، از مهمترین مسائل در مزارع پرورش دام و مراکز دفع زباله نزدیک به زیستگاههای شهری به شمار می رود. [49]

۲-۲-۲ جلوگیری از گرم شدن هوای کره زمین

یک واحد بیوگاز مستقر در مزارع پرورش دام ، با جمع آوری گاز متان حاصل از آن به عنوان منبع انرژی ، منجر به کاهش ورود گاز متان به جو زمین خواهد شد. [50] همچنین از آنجایی که هر مولکول متان (به عنوان یک گاز مهم گلخانه ای) ۲۱ تا ۲۳ برابر بیشتر از دی اکسید کربن گرما ایجاد می کند. از این رو یکی از مهمترین عوامل برای گرم شدن کره ی زمین به شمار می رود. [51]

۲-۲-۳ کاهش عوامل بیماری زا

برخی از اصلی ترین عوامل بیماری زا در فضولات دامی عبارتند از: سالمونلا^۱، یرسینیا^۲، اینتروکولیتیکا^۳، کریپتو اسپوردیوم^۴ و ژیا ردیا [50]. تخمیر بیهوازی می تواند مانع از انتقال عوامل بیماری زا شود و باکتری ها، انگل ها و کرم های موجود در معده ی حیوان را به کلی نابود کند. [50] تخمیر بی هوازی در دمای پایین (۱۰-۲۱ درجه سانتیگراد) به کاهش ۹۴-۱۰۰ درصدی عوامل بیماری زا کمک خواهد کرد. تخمیر

Salmonella ^۱

Yersinia ^۲

enterocolitica ^۳

Cryptosporidium ^۴

Giardia ^۵

بی هوازی باکتری‌های محدوده دمایی ۳۵-۴۱ درجه سانتیگراد سبب کاهش ۹۹/۹۹ درصدی در این عوامل بیماری‌زا خواهد شد. [52]

۴-۲-۲ کاهش تخم علف‌های هرز

تخم علف‌های هرز می‌تواند طی فرایند تخمیر بی هوازی از بین برود. [50-51] همچنین کود تولید شده در اثر تخمیر بی هوازی، بسیاری از مواد مغذی موجود در فضولات دامی را در خود نگه داشته و برای مصرف در کشت و کار آن‌ها را آماده‌تر می‌سازد.

در بسیاری از کشورها نیز قوانین و مقررات جدیدی مبنی بر مدیریت ضایعات بالاخص ضایعات بخش کشاورزی و محیط زیست در راستای جایگزینی با منابع شیمیایی وضع شده است که در اغلب موارد اجرای اینگونه سیاست‌ها با جدیت دنبال می‌گردد [53]. مدیریت صحیح کود دامی از مرحله جمع‌آوری، فرآوری و پخش در مزرعه مزایای بسیاری را برای واحد گاوداری خواهد داشت. از جمله این مزایا می‌توان به کاهش اثرات منفی زیست محیطی و فواید اقتصادی برای واحد گاوداری اشاره کرد [54]. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷ ، مدلی جهت ارزیابی زیست محیطی استراتژی‌های مختلف کود دامی در فرآیند تولید بیوگاز با در نظر گرفتن چرخه تولید نیتروژن و کربن و به کمک ارزیابی چرخه حیات توسعه داده شد. در این مطالعه اثر فرآوری کود با تولید بیوگاز و اثر آن در کاهش تولید گاز آلاینده متان ۷۵ درصد و همچنین بهبود کیفیت کود تولیدی حاصل از لجن هاضم ۵ درصد در شرایط مختلف دما، روش بی هوازی و تکنولوژی مورد مطالعه قرار گرفت [55]

۲-۳ انواع هاضم بی هوازی

هاضم ها دارای تنوع بسیاری هستند. هاضم ها از نظر ظرفیت ، شکل ظاهری ، تعداد راکتور ها و تک مرحله یا چند مرحله بودن بستر هضم، قابل تفکیک هستند. اما هاضم ها به دونوع اصلی جریان ناپیوسته و جریان پیوسته تقسیم می شوند.

۲-۳-۱ هاضم های جریان ناپیوسته

شامل یک مخزن است که مواد آلی به آن تزریق می شود و پس از گذراندن دوره ماند یک تا شش ماهه هضم شده و زیست گاز تولید می کنند. این نوع هاضم ها در شرایط ترموفیلیک یا مزوفیلیک و همچنین نوع زیست توده و نحوه اختلاط، راندمان های مختلفی خواهند داشت.[56]

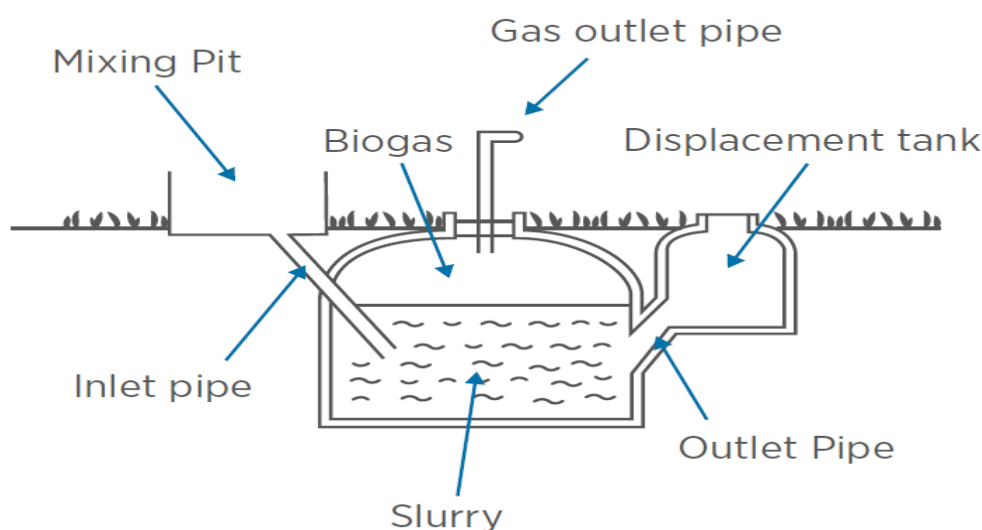
۲-۳-۲ هاضم جریان پیوسته

در هاضم های جریان پیوسته ، با توجه به اسم آنها، خوراک در فواصل زمانی منظم وارد مخزن می شود. در حالت تئوری برای داشتن حداکثر بازده، خوراک باید به طور مداوم وارد مخزن شود. اما به دلایل عملی مخزن به طور دائم تغذیه نمی شود و متداول ترین دوره ورود خوراک به طور روزانه می باشد. برای داشتن شرایط پایا در سیستم لازم است به همان میزان تغذیه روزانه عمل تخلیه از مخزن نیز انجام گیرد. انواع هاضم های زیر جزء مخازن جریان پیوسته محسوب می شوند.[56-57]

۲-۳-۳ انواع هاضم پر کاربرد

۲-۳-۳-۱ هاضم چینی

در سال ۱۹۳۱ توسط یک محقق چینی نوعی هاضم ساخته شد و با گذشت زمان تاکنون تغییرات و بهینه‌سازی‌هایی روی آن انجام شده است. ساختار اصلی این نوع هاضم شامل محفظه گازبندی شده‌ای است که با بتن و یا آجر و سنگ ساخته می‌شود (شکل ۲-۴). در هاضم‌های چینی فشار گاز ثابت نیست و در هنگام تولید زیست گاز فشار آن بالا می‌رود و در هنگام مصرف فشار آن با توجه به مقدار مصرف افت می‌کند. استفاده از شیرهای تنظیم فشار در مسیر خروجی یکی از روش‌های ایجاد فشار ثابت در این نوع هاضم‌ها است. اجزاء اصلی یک هاضم چینی در شکل ۲-۴ مشخص شده است.

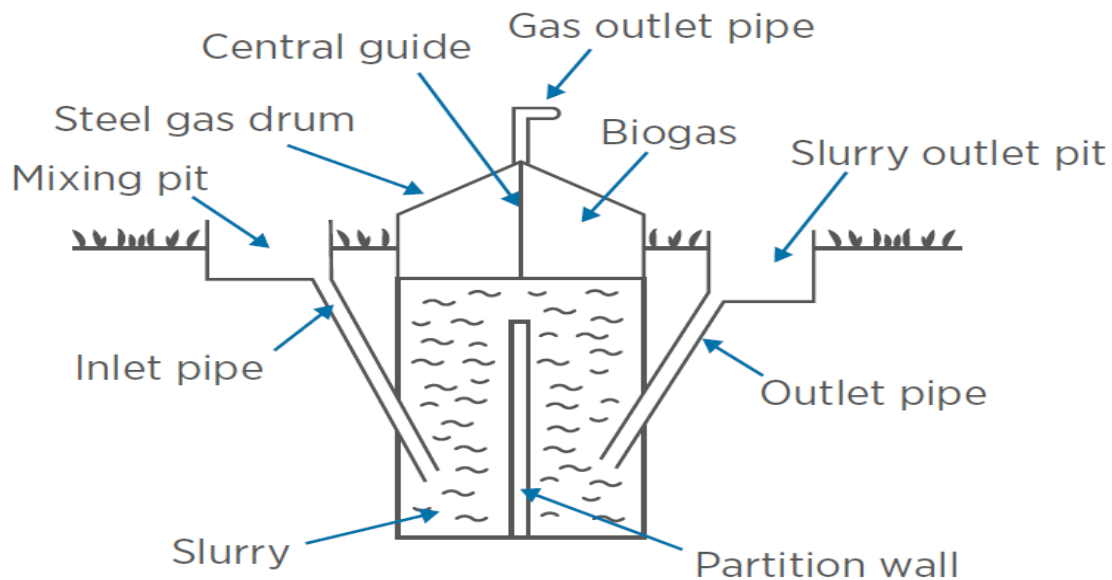


شکل ۲-۴ هاضم چینی [57]

۲-۳-۳-۲ هاضم هندی (هاضم با سرپوش شناور)

هاضم هندی دارای محفظه تخمیر از جنس بتن، سنگ و سیمان و یا آجر است. و دارای سقفی شناور از جنس فلز یا پلی اتیلن، فایبر گلاس و مصالح مشابه می‌باشد که وظیفه کنترل فشار را به عهده دارد. و با

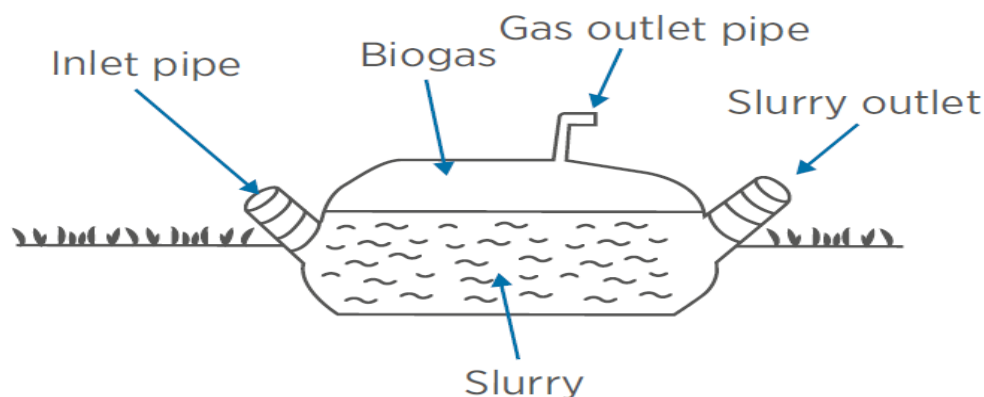
افزایش تولید زیست گاز سقف شناور به سمت بالا حرکت می کند در این صورت حجم هاضم افزایش یافته و فشار آن ثابت می ماند [56-57]. اجزاء اصلی یک هاضم هندی در شکل ۵-۲ مشخص شده است.



شکل ۵-۲ هاضم هندی [57]

۳-۳-۲ هاضم پلاگ فلو^۱

این نوع هاضم دارای یک مخزن افقی است که طول آن نسبت به عرض و ارتفاع بیشتر است. و از یک سمت مواد خام وارد هاضم شده و از سمت دیگر خارج می شوند. زیست گاز تولید شده از قسمت بالایی برداشت می شود. هاضم افقی از جنس های مختلفی از جمله پلی اتیلن ساخته می شود [58-59]. اجزاء اصلی یک هاضم پلاگ فلو در شکل ۶-۲ مشخص شده است.



شکل ۲-۶ هاضم پلاگ فلو [57]

۲-۳-۳-۴ هاضم بیهوازی با دیواره های جدا کننده

این هاضم ها با داشتن دیواره هایی در داخل مخزن هضم باعث حفظ توده های بیولوژیکی هضم می شود و می توان برای افزایش تعداد بافل ها راندمان بیشتری را انتظار داشت. راندمان و تنوع این هاضم ها نیز بالا است.

راکتور بافل دار بی هوازی^۱ راکتوری است که در آنها ردیف هایی از بافل ها قرار گرفته، تا سبب حرکت جریان فاضلاب از بالا و پایین بافل ها گردد. باکتری های موجود در راکتور بر اساس خصوصیات رفتاری جریان ممکن است معلق مانده یا ته نشین گردند [61,62].

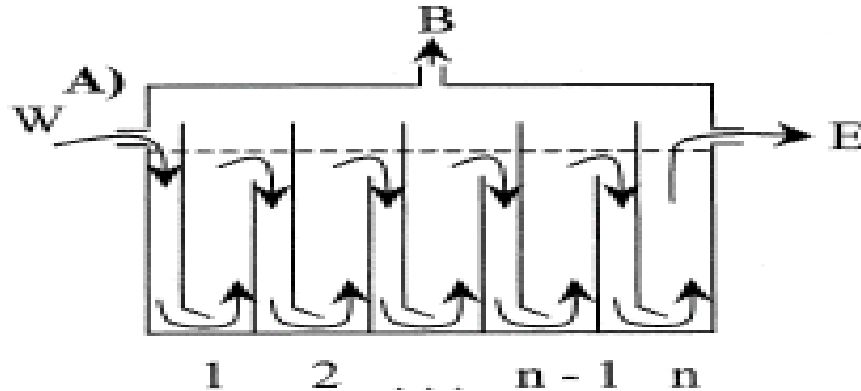
در راکتورهای^۲ UABR فاضلاب تصفیه نشده به پایین محفظه اول وارد می شود و بعد از پر شدن ردیف اول، فاضلاب به محفظه دوم سرریز می شود. و تا محفظه آخر که توسط بافل از هم جدا شده اند این روند بارگیری ادامه دارد. (شکل ۲-۷) با این روش در کف هر قسمت لجن ته نشین شده و به تولید زیست گاز

^۱ ABR-Anaerobic Baffled Reactor

^۲ UABR- Upflow Anerobic Baffle Reactor

منجر می‌شود. و گازهای تولید شده زیر سقف انباشته شده و به محفظه ذخیره زیست گاز هدایت می‌شود.

[61,62,63]



شکل ۷-۲ هاضم UBR [63]

۵-۳-۲ هاضم‌های چند مرحله‌ای:

همان‌طور که در شکل ۸-۲ و ۹-۲ ملاحظه می‌شود در یک هاضم چند مرحله‌ای هر یک از مراحل تولید زیست گاز در مخازن مجزایی انجام می‌شود. در این صورت شرایط بهینه در هر مرحله به وجود می‌آید و سرعت تکمیل فرایند ها بیشتر می‌شود. در برخی هاضم‌های چند مرحله‌ای از فناوری‌های و فرایندهایی تاثیر گذار استفاده شده است.

فرایند تماس بیهوازی

فرایند فیلتر بیهوازی

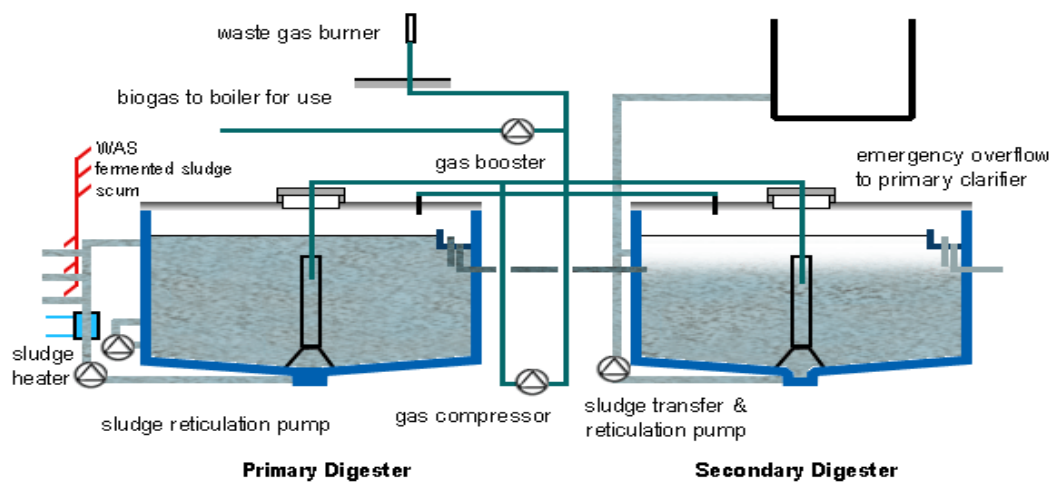
فرایند توده میکروبی متراکم^۱

هاضم بستر لجن بیهوازی

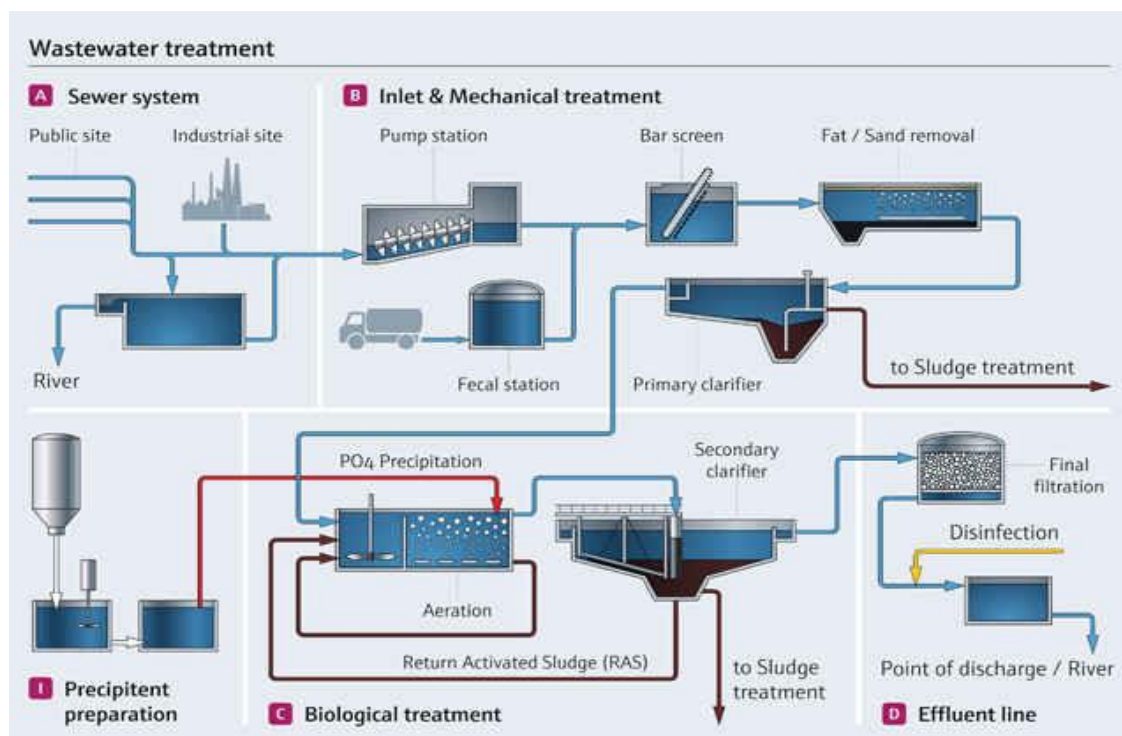
هاضم بستر سیال بی‌هوایی [۶۴]

^۱ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Sludge Digesters



شکل ۸-۲ هاضم دو مرحله ای دارای هضم اولیه



شکل ۹-۲ هاضم چند مرحله ای

با توجه به اهمیت ساخت هاضم‌ها و نیاز به تحقیقات در محیط آزمایشگاه در این پژوهش ابتدا انواع هاضم بی‌هوازی مورد پایش قرار گرفته و مواردی که موجب بهبود سرعت و کیفیت تولید بیوگاز می‌شوند، بررسی می‌گردد. و سپس اقدام به ساخت هاضم بی‌هوازی آزمایشگاهی کرده و با استفاده از انواع زیست‌توده به آنالیز و تحلیل خروجی‌های آن خواهیم پرداخت. زیست‌توده‌های کود گاو شیری نژاد هلشتاین و زیست‌توده تلفیقی کود گاو شیری نژاد هلشتاین و اسب نژاد ترکمن و همچنین تاثیرات اختلاط و غلظت زیست‌توده‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفت.

فصل 3: پیشینه تحقیق

برای کسب بازده بیشتر در فرایند استحصال زیست گاز از زیست توده تحقیقات و اقدامات بسیاری در جهان انجام شده است. تحقیقات و نوآوری‌های پیرامون تاثیرات نوع زیست توده و عوامل موثر بر تولید زیست گاز قابل توجه است که در این فصل به بررسی آن خواهیم پرداخت.

۱-۳ عوامل موثر بر هضم بی هوازی

لی دن و همکاران با مقایسه تولید بیوگاز از فضولات گاو در هاضم های پیوسته در زمانهای ماند مختلف، به این نتیجه رسیدند که تولید بیوگاز با افزایش زمان ماند کاهش می‌یابد [65]، کوئتوس و همکاران، نشان دادند که در هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی، افت pH باعث کاهش تدریجی بیوگاز و غلظت متان در بیوگاز می‌شود [66]. چائی و همکاران، فرآیند هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی را در درجه حرارت‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش کردند که با افزایش درجه حرارت بازده تولید متان افزایش می‌یابد [67].

بوکس تون و همکاران دریافتند که ثابت نبودن دمای هاضم، وجود آمونیاک زیاد، وجود اسید های چرب فرار، بارگذاری بیش از حد مواد آلی، بهینه نبودن زمان ماند، وجود مواد سمی و تخریب کننده میکرو ارگانیسم ها و کمبود برخی عناصر سنگین می تواند به کاهش شدید کارایی و یا حتی توقف کار هاضم منجر شود. [68]

۱-۱-۳ دما

دما پارامتر اصلی است که بر تولید بیوگاز تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، دمای بین ۰ درجه سانتی‌گراد و حدود ۹۷ درجه سانتی‌گراد طبق نظر هاکد و همکاران [69] می‌تواند متان تولید کند. داویسون دریافت آنزیم‌هایی که با فعالیت فرآیندهای متابولیکی مشخص می‌شوند، در باکتری‌ها اتفاق می‌افتد. میکرو ارگانیسم در دامنه های مختلف دما زنده می‌ماند. نوسانات دما فعالیت های آنزیم ها را منفی می‌کند، در نتیجه باعث

می‌شود روند هضم در سیستم مختل شود. باکتری‌های مختلفی که مسئول فناوری هضم بی‌هوازی هستند در دماهای مختلف شروع به فعالیت می‌کنند یا از کار می‌افتند. این‌ها باکتری‌های سرما دوست هستند که در دمای بین ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند، باکتری‌های مزوفیل که در دمای بین ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند و باکتری‌های گرما دوست که بین ۴۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت مطلوب‌تری دارند. [70] همچنین فعالیت‌های باکتری‌ها فراتر از شرایط دمایی بیش از ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز وجود دارد [71]. بدست‌آوردن دمای مزوفیلیک ۴۰ درجه سانتی‌گراد در تولید بیوگاز دشوار و دمای مطلوب برای شرایط مزوفیلیک ۳۵ درجه سانتی‌گراد است [72]. با توجه به مطالعات مارشایم، برای دمای محیط ترموفیلیک، مقدار مطلوب ۵۵ درجه سانتی‌گراد است. [73] سرعت واکنش و تولید بیوگاز با افزایش دمای محیط افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که دمای راکتور و نوع بستر بر روی فناوری هضم بی‌هوازی تأثیر می‌گذارد. به این دلیل که انتقال حرارت باعث کاهش دما می‌شود. مطالعه‌ای که توسط میسرا و همکاران انجام شده شامل طراحی و ساخت یک دستگاه گرمایشی خورشیدی است [74]. در این مطالعه، کارایی سیستم در هنگام دمای پایین در منطقه‌ای که پر تپه است کاهش می‌یابد. بیشتر هضم کننده‌های بیوگاز با استفاده از عایق به منظور ثابت نگه داشتن دما تا حد ممکن نصب می‌شوند. علاوه بر این، در مطالعه دیگری که توسط آناند و سینگ انجام شد، از پوشش ذغال به عنوان عایق برای ثابت نگه داشتن دمای هضم کننده بیوگاز استفاده شد [75]. براساس این مطالعه، دمای تولید بیوگاز ۳٪ افزایش یافت. یک اقدام احتیاطی با استفاده از پوشش ذغال سنگ به عنوان یک ماده عایق باید با پوشش زغال چوب که معمولاً هر یک و نیم ماه یکبار انجام می‌شود مقابله کند. از نظر اقتصادی، پوشش ذغال بسیار ارزان است و می‌توان آن را از طریق سوزاندن چوب تهیه کرد، که به طور گسترده در مناطق روستایی انجام می‌شود. عایق بندی مناسب هضم کننده‌های بیوگاز می‌تواند باعث افزایش تولید گاز در مناطق سردسیر شود. نمونه‌های دیگری از مواد عایق مناسب برای هضم کننده‌های بیوگاز، کامپوزیت ساخته

شده از پشم شیشه ، خاک اره ، گل رس و حتی در برخی مناطق آفریقا هاضم با پارچه سیاه پوشیده شده است [72,71].

مطالعات اخیر نشان داده است که جوامع میکروبی و مسیرهای متابولیکی در هضم بی هوازی تحت تأثیر دما قرار دارند. فعالیت های متابولیکی آنها با افزایش دما به طور قابل توجهی افزایش می یابد. اگر چه در دمای بالاتر که دمای گرمزایی است، هضم بی هوازی و همچنین خاصیت آبگیری مواد خوراکی هضم شده کاهش می یابد، [76,77] همچنین بیشتر مطالعات نشان می دهد که بین دما و همچنین ثابت سرعت جنبشی همبستگی وجود دارد. [74,77] در جدول ۱-۳ محیط های حرارتی هضم بی هوازی ارائه شده است.

جدول ۱-۳ دما و زمان ماند در فرایندهای هضم [۶۰]

محیط حرارتی	دمای فرایند (درجه سانتی گراد)	حداقل زمان ماند (روز)
پسیکروفیلیک	کمتر از ۲۰ درجه	۸۰-۷۰
مزوفیلیک	بین ۳۰ تا ۴۳ درجه	۴۰-۳۰
ترموفیلیک	بین ۴۳ تا ۵۵ درجه	۲۰-۱۵

PH ۳-۱-۲

PH عامل مهمی در رشد میکرو ارگانیسم ها و معیار تعیین میزان پایداری هاضم ها می باشد. در در یک راکتور بی هوازی فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم ها، منجر به تولید CO₂، اسیدهای چرب فرار و آمونیاک و در نتیجه باعث تغییر PH می شود [78]. عدم تعادل در فرایند هضم بی هوازی باعث تجمع اسیدهای چرب فرار و کاهش PH می شود [79,80]. PH کمتر از ۶ و بیشتر از ۸ اثر بازدارندگی بر متان زها را دارد. باقی ماندن PH در محدوده ۶٫۹-۷٫۰ نشان می دهد عملکرد هاضم در طول فرایند از ثبات خوب برخوردار بوده است و هاضم در شرایط بهینه رشد متان زها عمل کرده است. [79,80]. محدوده بهینه PH برای

میکرو ارگانیسم های بی هوازی ۶,۸-۷,۲ و بهترین PH برای متان زا ها ۷-۷,۲ می باشد و بیشترین کاهش در جامدات فرار در این محدوده رخ می دهد.[79]

ترکیبات مغذی بسترها مستقیماً رشد میکروبی و تولید بیوگاز را کاهش می دهد PH. بستر از سازگاری سریعتر جمعیت میکروبی به تغییر محیطها کمک می کند و مواد مغذی خاصی را برای جذب آسان میکروب ها حل می کند. حداکثر تولید بیوگاز هنگامی که PH مواد زائد مواد غذایی ۷,۰ بود ، با کاهش قابل توجهی در تولید بیوگاز در PH ۵,۰ و ۹,۰ در شرایط دسته ای مشاهده شد [81]. کربوهیدراتها، لیپیدها و پروتئینها در حفظ نسبت کربن به نیتروژن سالم (C / N) نقش دارند. پروتئین ها به عنوان منبع نیتروژن پس از تخریب به آمونیاک عمل می کنند. سطح بالایی از پروتئین ها در بستر ، به عنوان مثال، از محصولات گوشت ، با C / N پایین تر مطابقت دارد و با تولید آمونیاک بیش از حد منجر به بی ثباتی فرآیند می شود[82].

۳-۱-۳ غلظت و آنزیم ها

ازدیاد بعضی از باکتر ها و قارچ ها جهت افزایش تولید بیوگاز، بوسیله برانگیختن فعالیت آنزیم های مخصوص، شناخته شده است. ازدحام سلولوزیکی مانند اکتینومیسیتس^۱ جهت بهبود تولید بیوگاز از دام در 6 تا 44 درصد، شناخته شده است [83]. طی چهار بخش مطالعه باکتری فیبرولیتیک^۲ از روده بزرگ دام که از سلولز، زیلان^۳ و لیگنین^۴ به عنوان سوبستره انتخابی استفاده می کنند، جدا شده اند. این ترکیب به عنوان تلقیح برای تخمیر مصنوعی مدفوع، موجب افزایش درصد گاز متان و درصد تولید زیست گاز گردید و به تولید

^۱ Actinomycetes

^۲ fibrolytic

^۳ Xylan

^۴ Lignine

کلی گاز، میزان ۳۴ درصد در مقایسه با تخمیر طبیعی توسط باکتری های مدفوعی اضافه شده است.[84] با افزایش نرخ بارگذاری بازده تولید بیوگاز کاهش داشته است[85]. آنزیم اضافه شده به مخلوط لجن قبل از هضم بی هوازی، موجب بهبود هضم لجن و افزایش تولید گاز متان شده است[86]. مطالعه انجام شده توسط پلیچ نیز نشان داد که استفاده از آنزیم های هیدرولیتیک^۱ افزایش سیالیت مواد آلی پیچیده را که به افزایش تولید بیوگاز به کاهش مصرف برق می انجامد، موجب خواهد شد[87]. استفاده از دوغاب پس مانده از هاضم همراه با دوغاب تازه موجب بالا بردن جمعیت باکتری در مخزن تخمیر خواهد شد که قطعا فرآیند تولید گاز را سرعت می بخشد[88]. انتخاب نوع پسماند از این جهت مهم است که مواد موجود در پسماند ها می تواند در روند و فرایند هضم بسیار تاثیر گذار باشد. در پسماند های دامی نوع تغذیه در این امر موثر است. در جدول ۲-۳ مشخصات خوراک کنسانتره گاو شیری و مواد موجود در آن آورده شده است.

جدول ۲-۳ مشخصات خوراک کنسانتره[89]

اقلام جیره	ماده خشک (DM)	قابلیت هضم (DE)	پروتئین خام (CP)	انرژی ناخالص (GE)	فسفر (P)	پتاسیم (K)	سدیم (Na)
	گرم/کیلوگرم	%	گرم/کیلوگرم	مگاژول/کیلوگرم	گرم/کیلوگرم	گرم/کیلوگرم	گرم/کیلوگرم
کنسانتره	۸۹۴	۸۰,۹۴	۱۵۷,۷۲	۱۶,۱	۶,۸۹	۱۰	۰,۲
سیلو	۳۷۰	۷۱,۹	۱۸۶	۱۹,۱	۱,۷	۱۰,۴	۰,۱
یونجه	۸۹۴	۶۱,۸	۲۰۳,۶	۱۸,۲	۲,۶	۲۴,۶	۰,۲
کاه گندم	۹۱۰	۴۸,۴	۴۶,۱۵	۱۸,۵	۰,۷	۱۱,۲	۰,۱
کنجاله پنبه	۹۲۲	۸۱,۷	۴۹	۲۱,۲	۱۲,۴	۱۶,۶	۰,۹
ملاس	۷۳۰	۷۹,۷	۷۵,۳۴	۱۴,۱۷	۰,۷	۵۱	۲,۴
بذر پنبه	۹۲۳	۶۲,۸	۲۳۶,۱۸	۲۳,۸	۵,۹	۱۲	۰,۱

^۱ Hydrolytic

رطوبت کم و غلظت بالای مواد جامد موجب تراکم مواد و زیاد شدن اسید های فعال می شود و فرایند تخمیر طولانی تر می شود [90]. درصد بالای ماده جامد موجب اختلال در انتقال مواد نیز می گردد و نباید در صد آن از ۱۱ بیشتر شود. [91] مناسب ترین غلظت خوراک هاضم در هضم بی هوازی بین ۷ تا ۹ درصد ماده جامد می باشد. [92] در سیستم های تولید بیوگاز با مواد جامد نرخ بارگذاری حدود ۷-۸ درصد، افزایش قابل توجهی در تولید گاز نشان می دهد [93].

۴-۱-۳ اختلاط

همزدن باعث ایجاد مخلوطی همگن می شود و از ایجاد پوسته روی سطح و رسوب جامدات در کف راکتور جلوگیری می کند. [94] با همزدن پیوسته و همزدن متناوب کود در مقیاس آزمایشگاهی در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۱,۳ درصد و ۱۲,۵ درصد تولید بیوگاز را افزایش داده است. [94] مطالعات نشان می دهد که همزدن کافی می تواند توزیع مواد و آنزیم ها و میکرو ارگانیسم ها در هاضم های بی هوازی بهبود بخشد. در حالی که همزدن ناکافی منجر به تشکیل لایه خشک در سطح مواد جامد در مخزن می گردد. [95] شدت همزنی بر میزان تولید بیوگاز طی تخمیر بی هوازی زباله شهری نشان داد همزدن آرام منجر به افزایش سرعت و حجم تولید بیوگاز می گردد. [96] عملکرد در مخازن همزدن دار با شدت هم زنی بالا عملکرد بی ثباتی دارند و در مخازن همزدن دار با سرعت پایین در تمام سرعت های بارگذاری عملکرد خوبی داشته اند. [97,98]

وجود همزن تاثیر زیادی در حجم و نیز در روند تولید بیوگاز از فضولات گاوی دارد. بیشترین حجم تولید بیوگاز در سرعت ۴۰ دور در دقیقه بیشترین حجم تولید زیست گاز به دست آمد و در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه کمترین حجم تولید زیست گاز مشاهده شد. حجم تولید زیست گاز در جریان آشفته از حالت بدون همزن نیز کمتر است و در این حالت تولید گاز از رابطه خاصی پیروی نمی کند. [100]

۵-۱-۳ C/N نسبت کربن به نیتروژن

نسبت C/N بهینه‌ی هاضم‌های بی‌هوازی ۲۰ الی ۳۰ بر اساس کربن آلی قابل تجزیه در نظر گرفته می‌شود. این نسبت برای فضولات گاوی حدود ۲۴ می‌باشد. [101] در صورتی که نسبت C/N بالا باشد، نیتروژن سریعاً توسط باکتری‌های متان‌زا مصرف می‌شود و نرخ تولید گاز کاهش می‌یابد. اگر نسبت کربن به نیتروژن پایین باشد و یا مقدار نیتروژن بالا باشد، امکان تجمع آمونیاک و افزایش PH به بالاتر از ۸٫۵ وجود دارد [102,103].

خصوصیات بیوگاز عمدتاً توسط نسبت C/N خوراک تعیین می‌شود. باکتری‌های بی‌هوازی برای زنده ماندن و فعالیتهای متابولیسمی نیازمند کربن و نیتروژن هستند که کربن را به عنوان منبع انرژی و ازت را برای ساختن دیواره سلولی خود مصرف می‌کنند. نسبت این مواد در کنترل فعل و انفعالات شیمیایی درون هاضم بسیار مهم است [104]. وقتی این نسبت زیاد می‌شود جذب نیتروژن توسط متانوژن‌ها برای برطرف سازی نیاز پروتئینی خود، افزایش می‌یابد و با محتوای کربنی واکنش نمی‌دهند در نتیجه تولید گاز کاهش می‌یابد [105]. و بالعکس زمانی که این نسبت کم می‌شود نیتروژن آزاد شده، انباشته شده و متعاقباً منجر به تجمع آمونیاک می‌شود که این امر موجب بالا رفتن قلیائیت می‌گردد و اثر سمی بر روی جمعیت متانوژن‌ها دارد و تبعات کاهش تولید گاز را به دنبال دارد. گفتنی است در ضایعات با درصد بالای کربن تخریب‌پذیر، نسبت کربن به نیتروژن نمی‌تواند تاثیر مهمی در روند تخریب بگذارد. [106]

جدول ۳-۳ نسبت C/N در برخی زیست توده ها [119]

نسبت (C/N)	زیست توده	نسبت (C/N)	زیست توده	نسبت (C/N)	زیست توده
۵۰-۵۳	پسماند برگ	۵۱-۶۷	کاه برنج	۶-۲۵	کود گاو
۱۰-۲۵	علوفه و متعلقات آن	۵۰-۱۵۰	کاه گندم	۳-۱۵	کود ماکیان
۷۰-۷۹	علف هرزه دریایی	۱۴۰-۱۵۰	تفاله نیشکر	۳-۱۴	کود خوک
۷۵-۱۰۰	جلبک	۵۰-۵۶	ساقه ذرت	۳۰-۳۳	کود گوسفند
۱۲-۱۷	یونجه	۴۸-۵۰	کاه جو	۲۰-۲۵	کود اسب
۲۰۰-۵۰۰	خاک اره	۲۰-۳۱	پوست بادام زمینی	۲۵-۲۹	پسماند آشپزخانه
۳-۵	محتوای معده و روده	۳۵-۴۶	برگ چغندر	۷-۳۵	پسماند میوه و سبزیجات
۴-۱۰	گنداب مخمر	۱۶-۴۰	ضایعات غلات	۳-۱۷	پسماند غذایی
		۱۰۰-۱۵۰	پسماند باغی	۲۲-۳۷	پسماند کشتارگاه

زیست توده هایی که نسبت کربن به نیتروژن آن در حدود ۱۱ تا ۳۵ باشد برای تولید انرژی مناسب می باشد. [106] همچنین نسبت C/N نزدیک به ۳۱ مناسب ترین حالت برای زیست توده تزریقی به راکتور بی هوازی می باشد. [107] برای بهتر کردن نسبت کربن به نیتروژن زیست توده و افزایش تولید زیست گاز منابع دارای کربن را می توان مورد استفاده قرار داد [107]. در بررسی ترکیب کود خوک با اوره و گلوکز نسبت کربن به نیتروژن ۱۵ تا ۱۹ بیشترین زیست گاز را تولید کرد. و نسبت بالاتر از این باعث ناپایداری بیولوژیکی هاضم گردید. [108] جدول ۳-۳ نسبت کربن به نیتروژن برخی زیست توده ها آورده شده است.

نسبت کربن به نیتروژن تحت تاثیر کربوهیدرات ها، لیپیدها و پروتئین ها است. منبع نیتروژن پروتئین ها هستند و بعد از شکست و تجزیه آمونیاک می سازند. و موادی مانند گوشت با مقدار پروتئین بالا باعث تولید آمونیاک زیاد می شوند که فرایند هضم را مختل می سازد. [110]

۳-۱-۶ وجود مواد تسریع کننده واکنش

تلاش های زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت برای از بین بردن آمونیاک با استفاده از نوار گاز سیل جانبی [111]، مخلوط کردن گاز [112]، سونوگرافی [113]، تابش میکروویو [114] و سایر روش های

فیزیکی و شیمیایی انجام شده است [115]. عناصر معدنی نیز توسط محققان و سازمانهای مختلف به عنوان یک روش جایگزین برای دستیابی به یک فرآیند پایدار پیشنهاد شده است [116,117].

هنگامی که خون آبه کشتارگاهی، جگر سفید، گوشتهای فاسد شده و مواد آلی سرشار از چربی و کربوهیدرات به خوراک هاضم افزوده می شود، که نقش کاتالیزور را ایفا می کند و فرآیند اسیدزایی سرعت می گیرد و فرایند متان زایی زودتر شروع می شود در نتیجه تولید زیست گاز بهینه می گردد. [118]

۷-۱-۳ زمان ماند

زمان ماند در فرایند تولید زیست گاز به نوع راکتور، نوع و غلظت مواد تزریق شده، دمای هضم و مواد تسریع کننده فرایند هضم بستگی دارد. (جدول ۳-۱)

جدول ۳-۱ دما و زمان ماند در فرایندهای بی هوازی [60][121],[120]

محیط حرارتی	دمای فرایند (درجه سانتی گراد)	حداقل زمان ماند (روز)
پسیکروفیلیک	کمتر از ۲۰ درجه	۸۰-۷۰
مزوفیلیک	بین ۳۰ تا ۴۳ درجه	۴۰-۳۰
ترموفیلیک	بین ۴۳ تا ۵۵ درجه	۲۰-۱۵

۳-۲ معرفی کار حاضر، ضرورت انجام تحقیق، نکات برجسته و نوآوری کار حاضر.

۳-۲-۱ کار انجام شده

فرایند تولید بیوگاز در هاضم‌ها مشترک است و در هاضم‌های صنعتی بهبود در انجام فرایند در هر مرحله مد نظر قرار گرفته است ، در این فصل با توجه به تحقیقات پیشین طراحی دستگاه هاضم با قابلیت‌های زیر نیز لحاظ گردید.

- ❖ ابعاد آزمایشگاهی و با حجم راکتور ۵۰ لیتر
- ❖ خوراک دهی پیوسته و ثابت
- ❖ کنترل دمای سوبسترا
- ❖ همزن با دور قابل تنظیم
- ❖ پیش گرم سوبسترا قبل از ورود به راکتور
- ❖ کنترل PH و نمونه برداری از سوبسترا در سطوح پایین و بالا در دوره ماند (SAMPLING CONNECTION)
- ❖ امکان تزریق مواد به سوبسترا به منظور مهار عوامل موثر سطوح پایین و بالا (DOSING CONNECTION)
- ❖ امکان نصب پنل خورشیدی جهت گرمایش و به منظور تامین برق همزن
- ❖ امکان نصب آبگرمکن خورشیدی جهت مهیا کردن شرایط ترموفیلیک و مزوفیلیک

۲-۲-۳ ضرورت انجام تحقیق

بر اساس نتایج این طرح در مرداد ماه سال ۱۳۹۶، تعداد ۱،۴ میلیون بهره‌بردار داری دام در سطح کشور وجود داشته است که تعداد دام این بهره‌بردارها، ۴۰ میلیون رأس گوسفند، ۱۵،۷ میلیون رأس بز و ۴،۹ میلیون رأس گاو بوده است. [122] در استاندارد انجمن مهندسان کشاورزی امریکا به شماره ۲۰۰۳- (ASAE D384.1 FEB03) گاوهای شیری، تلیسه و نر به ترتیب حدود ۵ / ۶ و ۸ / ۲، ۸ / ۶ و گوسفند و بز حدود ۴ درصد وزن زنده شان در روز کود تر تولید می‌کنند. [123] با این حساب در کشور ایران سالانه بیش از ۳۲ میلیون تن ضایعات کود دامی تولید می‌شود. این درحالی است که عدم مدیریت جامع پسماندهای دامی منبع مهم آلودگی آب و هوا به شمار می‌رود. رها شدن گاز آمونیاک، نفوذ ترکیبات نیتروژن و فسفر به آبهای سطحی و زیرزمینی، وجود عوامل بیماری‌زا از مهم‌ترین تهدیدهای این پسماندها است. افزون بر این ۱۸ درصد از تصاعد گازهای گلخانه‌ای مربوط به صنایع دامی گزارش شده است. این درحالی است که مدیریت کارا و مناسب پسماندهای دامی افزون بر دفع خطرهای فوق، می‌تواند آن را به منبع تجدیدپذیر انرژی و تولید کود و مواد مغذی برای استفاده در بخش کشاورزی تبدیل کند. وضع قانون‌های سخت گیرانه در خصوص رهاسازی پساب‌های صنعتی به سیستم تصفیه فاضلاب‌های شهری و هزینه بر بودن دفع پسماند به صورت خاکچال، یا سوزاندن، تصفیه پسماندهای روزافزون کشاورزی و دامی را به مشکلی جدی برای صاحبان صنایع تبدیل کرده است. در سالهای اخیر، هضم بی هوازی به عنوان روش تجزیه زیستی به منظور تصفیه پسماندهای آلی مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. هدف از هضم بی هوازی پسماند، تبدیل آن به دو گروه از مواد با ارزش و مورد نیاز، یعنی بیوگاز و کود کشاورزی است. سایر مزایای زیست محیطی این روش به طور خلاصه عبارتند از:

❖ تولید گاز متان از یک منبع انرژی تجدید پذیر. (بیوگاز)

❖ جلوگیری از آلودگی آبهای سطحی و زیرزمینی.

❖ کاهش انگل‌ها و سایر عوامل بیماری‌زا به دلیل تجزیه در حین عملیات هضم.

❖ بهبود کودددامی و حذف میکروب و عوامل بیماری‌زای آن.

❖ کاهش بوی نامطبوع و دفع حشرات مزاحم.

❖ رشد اقتصادی کشاورزان و دامپروران.

۳-۲-۳ روش تحقیق

- ✓ جمع‌آوری و بررسی اطلاعات موجود در زمینه تحلیل سیستم‌های تولید گاز متان به وسیله هاضم‌ها
- ✓ طراحی و ساخت دستگاه هاضم
- ✓ انجام آزمایش و تحلیل نتایج حاصل
- ✓ ارائه نتایج حاصل

۳-۲-۴ اهداف پژوهش

۱. ساخت دستگاه هاضم بی‌هوازی در مقیاس آزمایشگاهی
۲. بررسی پتانسیل زیست توده‌ها در تولید بیوگاز
۳. افزایش تولید انرژی (به دلیل پیش بینی افزایش ۷ درصدی تقاضای برق در هر سال)
۴. افزایش توانمندی پدافند غیر عامل در شبکه انرژی مطابق سیاست‌های برنامه ششم توسعه کشور
۵. افزایش ظرفیت نیروگاه‌های برق با سوخت تجدیدپذیر

۳-۲-۵ نوآوری

۱. ساخت هاضم بی‌هوازی در ابعاد کوچک آزمایشگاهی برای پسماندهای دامی، کشاورزی و زباله و تصفیه خانه
۲. بررسی زمان ماند و دمای کاری بر عملکرد هاضم بی‌هوازی

۳. تحلیل میزان تولید بیوگاز از پسماندهای مختلف در دوره‌های مختلف
۴. بررسی امکان ساخت هاضم‌های بی‌هوازی با ورودی پسماندهای متفاوت به منظور استفاده در تمام فصول سال و انتخاب نوع پسماند ورودی با توجه به فراوانی محصول در آن مکان و مقطع زمانی
۵. امکان تلفیق و تلقیح پسماندهای دامی، گیاهی و انسانی با یکدیگر
۶. امکان پایش رفتار سوبسترا در هاضم و امکان افزودن ترکیبات جدید به عنوان کاتالیزور یا مهارکننده واکنش به سوبسترا در زمان ماند جهت تسریع یا توقف در هر مرحله از هضم .
۷. امکان اختلاط سوبسترا در دوره‌های مختلف و زمان بندی‌های متغیر

فصل 4 : طراحی

وساخت هختم بی

هوازی و بررسی عملکرد

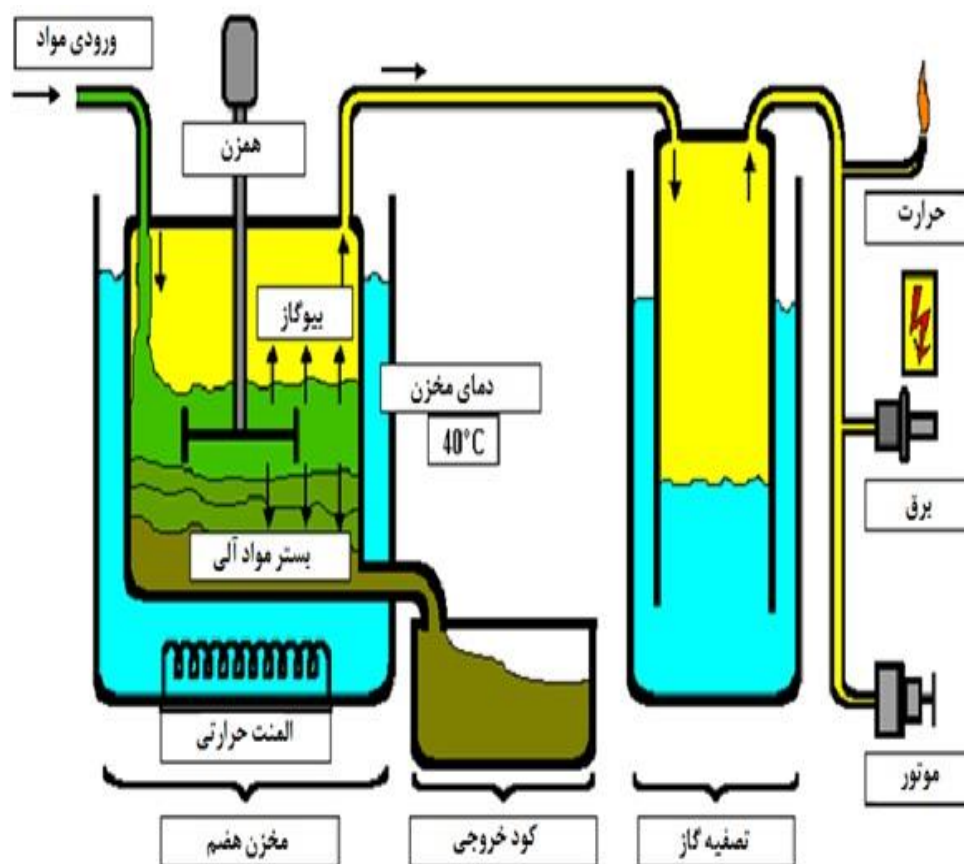
هختم

در سال‌های اخیر استحصال انرژی از منابع تجدیدپذیر که دارای پتانسیل بالایی هستند مورد توجه بسیار قرار گرفته است. و در این بین تحصیل بیوگاز از زیست توده علی رغم تولید انرژی در مهار و ساماندهی پسماند هم کمک‌رسان بشر است. از این رو ساخت هاضم‌ها در ابعاد مختلف و با قابلیت‌های متنوع محقق گردیده است. با توجه به تنوع اقلیمی و تاثیرات نوع زیست توده راندمان‌های استاندارد برای هاضم‌ها نمی‌توان در نظر گرفت. اما فرایند هضم بی‌هوازی در کلیه هاضم‌ها در چهار مرحله انجام می‌گیرد و عوامل موثر در هر مرحله مورد مطالعه قرار گرفته است. مهم‌ترین عواملی که بهره‌برداری و هضم را دچار اختلال می‌سازد عبارتند از: خیلی پایین یا خیلی بالا بودن PH، وقتی قلیائیت محتویات هاضم خیلی کم باشد، بارگذاری زیاد هاضم، غلظت زیاد اسیدهای آلی، وجود و حضور مواد سمی، حضور اکسیژن آزاد و تغییرات زیاد درجه حرارت.

در طول ۲۰ سال گذشته، هضم بی‌هوازی (AD) در اروپا برای تصفیه لجنیات، کود دامی و پسماندهای زراعی و همچنین زباله‌های صنعتی و تجاری مورد توجه بیشتری در اروپا قرار گرفته است. [123] معمولاً راکتورهای مقیاس بزرگ برای تصفیه انواع مختلفی از پسماندهای آلی از مزارع صنعتی و جوامع استفاده می‌شوند. در عوض، هضم کننده‌های کوچک معمولاً در مزارع لینی به منظور بهبود مدیریت کودها و هم برای تثبیت زباله های دام و هم برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر در جوامع کشاورزی روستایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. و این کار موجب کاهش انتشار بو و متان در منطقه نیز می‌گردد. ترکیب بستر بسته به فصل و در دسترس بودن مواد مختلف می‌تواند تغییر کند. [124] پتانسیل تولید بیوگاز از کودهای حیوانی در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱ پتانسیل تولید بیوگاز در انواع کود دامی [125,126]

مواد زیست تجدید پذیر	بیوگاز قابل استحصال (Litr/Kg)	درصد متان موجود در بیوگاز
کود گاو	۲۶-۲۸	۵۰-۶۰
کود گوسفند	۲۲-۲۴	۴۰-۵۰
کود اسب	۲۰-۳۰	۵۰-۶۰
کود بز	۴۰-۶۰	۵۰-۶۰



شکل ۴-۱ نوعی دستگاه هاضم بی‌هوازی

۴-۱ اهداف ساخت

در این پژوهش دستگاه هاضم ساخته شده قابلیت تغییر پارامترهای تاثیر گذار بر روند تولید را دارد. هدف اصلی این پروژه بررسی تولید بیوگاز در هاضم بی‌هوازی است. و باتوجه به کاربرد آزمایشگاهی دستگاه هاضم و تنوع سوبسترها (پسماندهای دامی - کشاورزی - صنعتی، زباله تر، ضایعات جنگلی و...)، در انتخاب ابعاد، جنس مواد مورد استفاده و قابلیت‌های کنترل و تغییر عوامل موثر بر روند تولید بیوگاز توجه بیشتری شده است. محل استقرار هاضم و نحوه راه اندازی و بهره‌برداری در پیوست ۱ ارائه گردیده است.

۲-۴ ابعاد

در طراحی هاضم‌های بی‌هوازی مورد استفاده در محیط آزمایشگاه، میزان کنترل و همچنین دقت داده‌های به دست آمده می‌بایست در نظر گرفته شود. این دستگاه ترکیبی از دستگاه هاضم چینی و هندی است. در زمانی که فقط از محفظه ذخیره گاز راکتور استفاده شود هاضم چینی است و فشار تا زمان عمل شیر اطمینان بالا می‌رود اما اگر مسیر مخزن انعطاف پذیر (تیوب منبسط شونده) باز باشد با افزایش فشار گاز تولید شده باعث انبساط مخزن دوم شده و فشار تا زمان پر شدن آن به مرور بالا می‌رود.

این دستگاه هاضم دارای راکتوری به قطر ۳۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲۴ سانتی‌متر با حجم ۱۰۰ لیتر می‌باشد. بیشترین حجم زیست توده ۵۵ لیتر و فضای باقی مانده، محفظه ذخیره گاز موقت است. لایه دوم پیرامون راکتور با قطر ۴۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ سانتی‌متر دارای حجم ۷۸ لیتر می‌باشد. و یک تیوب به حجم صفر تا ۱۸ لیتر به عنوان مخزن ذخیره گاز دوم و منبسط شونده نیز بر روی آن نصب گردید. به دلیل عبور لوله تغذیه هاضم با سایز ۵۱ میلی‌متر از بین جداره اول و دوم می‌بایست قطر جداره بیرونی حداقل ۱۲۰ میلیمتر بزرگتر باشد.

در زیر به پارامترهای موثر در انتخاب ابعاد فوق اشاره شده است.

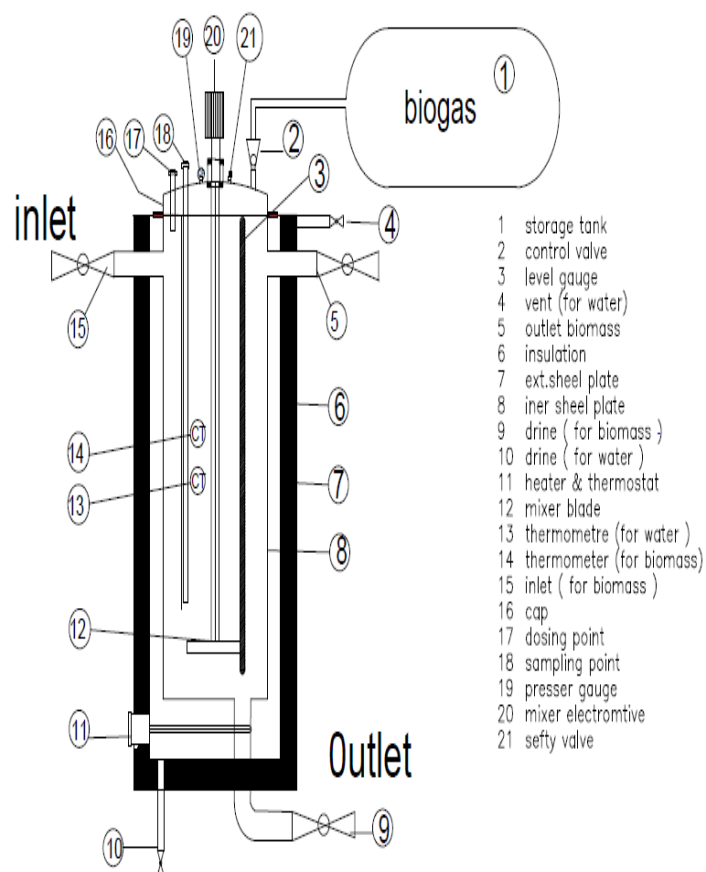
- ✓ دستگاه هاضم قابلیت جابجایی داشته باشد.
- ✓ حجم راکتور طوری باشد که سوبسترای تزریقی به سهولت قابل تامین و دفع باشد.
- ✓ در راکتورهایی با حجم بسیار کم کنترل شرایط سخت بوده و آماده سازی جهت احیای سوبسترا امکان پذیر نمی‌باشد.
- ✓ در برخی آزمایش‌ها تاثیرات تزریق مواد ثانویه در حین فرایند مورد مطالعه قرار می‌گیرد لذا می‌بایست ابعاد طوری انتخاب شود که تزریقات کم و زیاد تاثیرات آنی نداشته باشد و خطاهای سهوی و کوچک تاثیر بالایی بر عملکرد نداشته باشد.

۳-۴ جنس مواد و مصالح ساخت هاضم

به علت اینکه کمترین تاثیر از جنس را داشته باشیم و از خوردگی در PH پایین و زمان تولید H2S جلوگیری کنیم، مخزن هضم و محل تجمع گاز در مخزن از جنس استنلس استیل ضد خوردگی (316L) مورد استفاده در صنایع غذایی و با ضخامت ۱,۲۵ استفاده شده است. و جداره بیرونی با ورق فولادی ST37 با ضخامت ۳ میلی متر ساخته شد. تمام لوله ها و اتصالات مرتبط با زیست توده از جنس استنلس استیل یا پلی اتیلن است. به دلیل ارتقاء کیفیت جوشکاری و فرم دهی مناسب علی رقم فشار پایین مخازن و ضد خوردگی بودن ورق داخلی راکتور، ضخامت ورق های به کار رفته از ورق های جداره داخلی و جداره خارجی طراحی شده، بالاتر انتخاب شد.

۴-۴ ورودی و خروجی

این هاضم دارای ورودی از بالا و از پایین می باشد. که تعیین آن در ابتدای تزریق و با مسدود کردن مسیر دوم امکان پذیر است. با توجه به حجم راکتور هاضم و لوله های استنلس استیل قابل تامین، اندازه قطر لوله های ورودی ۵۱ میلی متر انتخاب شده است. در ابتدای مسیر ورودی نیز یک حوضچه ورودی نصب شده است که قابلیت نصب خرد کن را دارا می باشد. ورود خوراک به هاضم به وسیله شیرها کنترل می گردد. مسیر ورودی پایین مواد تزریقی از داخل جداره آب گرم عبور کرده و پیش گرم می شود. مسیر خروجی نیز مانند مسیر ورودی از بالا و پایین بوده و مطابق شکل ۴-۲ با جابجایی اتصالات مسیر مورد نظر در آزمایش تعیین می گردد.



شکل ۴-۲ قسمت های مختلف هاضم

۴-۵ سنسورها

۴-۵-۱ سنسور دما

به منظور کنترل دمای راکتور از دو دماسنج و یک ترموستات استفاده شده است. دماسنجهای نصب شده در داخل راکتور و داخل جداره اول به ترتیب دمای مواد هضم شونده و دمای آب را نمایش می دهد. ترموستات نیز وظیفه کنترل دما در بازه مد نظر آزمایش را عهده دار است.



شکل ۳-۴ نمایشگر سنسورهای دمای آب و زیست توده



شکل ۴-۴ ترموول (THERMOWELL) نصب شده جهت نصب سنسور برای به دست آوردن دمای

زیست توده

۲-۵-۴ سنسور فشار

به منظور کنترل فشار و اندازه گیری فشار مخزن از یک گیج فشار ۶ بار و یک شیر اطمینان در بالای مخزن و در محل تجمع بیوگاز نصب شده است. که در صورت افزایش فشار راکتور به بالای ۲,۵ بار شیر اطمینان باز شده و تا زمان کاهش فشار تا ۱ بار مسیر را باز نگه می دارد. به منظور کاهش خطرات احتراق بر روی شیر اطمینان مسیر خروجی تا ارتفاع ۷۰ سانتی متر بالای تجهیز نصب گردید.



شکل ۴-۵ گیج فشار و شیر اطمینان

۳-۵-۴ کنترل PH

به منظور ثبت و کنترل PH می بایست از از سوپسترا نمونه گیری شود و به وسیله PH متر مقدار آن را دانست. از دریچه های تعبیه شده در قسمت بالای مخزن جهت نمونه گیری یا تزریق مواد موثر بر هضم استفاده می شود .

احتیاط : در زمان فشار دار بودن راکتور باز کردن دریچه های نمونه گیری مجاز نمی باشد.



شکل ۴-۶ اندازه گیری PH

۴-۶ کنترل دما

دمای مواد داخل راکتور با آب موجود در جداره اول قابل تنظیم و تثبیت می‌باشد. آب داخل جداره به وسیله یک المنت الکتریکی گرم می‌شود و در دمای مورد نیاز با ترموستات قابل کنترل است. جداره بیرونی با عایق ۲۵ میلی‌متر و کاور پلاستیکی مانع تبادل دمایی با محیط می‌گردد. می‌توان با نصب آبگرمکن خورشیدی برای گرم کردن آب از انرژی خورشیدی استفاده کرد.



شکل ۴-۷ ترموستات و المنت حرارتی جهت کنترل دمای آب

۴-۷ اختلاط

۴-۷-۱ پره

به منظور مخلوط کردن مواد داخل راکتور از پره پارویی استفاده شده است. که $\frac{3}{1}$ ارتفاع مواد یعنی ۲۰ سانتی‌متر از کف راکتور فاصله دارد. این فاصله در طراحی همزن برای راکتور ها بهینه است [125]. همچنین قابلیت نصب ردیف دوم پره ها در ارتفاع دلخواه نیز در این هاضم دیده شده است. طبق پژوهش‌های پیشین در این نوع از همزن‌ها، پره جریان موازی محور همزن ایجاد کرده و مانند پمپ، سیال را از بالا مکش کرده

و به پایین تانک هدایت می کند. سیال بنا به اصل بقای ماده در نقاط دور از پره همزن، به بالا حرکت می کند و به این ترتیب سیال در داخل مخزن مخلوط می گردد [125]. در همزن های از این نوع تیغه های پره زاویه کمتر از ۳۰ درجه با صفحه چرخش ایجاد می کنند، از جمله این همزن ها می توان همزن های پره ملخی و همزن های توربینی با پره شیب دار را نام برد. [126]

۴-۷-۲ سرعت

چرخش به منظور ایجاد جریان آرام در ۳ سرعت ۵۰-۷۰-۱۲۰ دور در دقیقه قابل تنظیم می باشد. و تعداد دفعات اختلات و مدت زمان انجام آن به وسیله دستگاه مدار فرمان هفتگی تنظیم می گردد.

۴-۷-۳ الکترو موتور

در این طرح با توجه به اهداف و استفاده از منابع تجدیدپذیر از یک الکتروموتور DC استفاده شد. تا بتوان جهت ارتقاء دستگاه از پنل های خورشیدی یا پیل سوختی و... به عنوان منبع تغذیه استفاده کرد.

جدول ۴-۲ کاربرد انواع پره در مخازن

نوع پره	موارد کاربرد	افزایش گرانروی	افزایش سرعت پره
ملخی	انحلال مایعات با گرانروی کم		
توربینی	پخش گاز در مایع با گرانروی کم		
پارویی	اختلاط دو فاز مایع نامحلول		
	تعلیق جامد در مایع با گرانروی کم		
لنگری	اختلاط مایعات با گرانروی بالا		
حلزونی			

ساخت این نوع پره ها بسیار ساده است زیرا از یک صفحه صاف متصل به محور تشکیل شده است. پره پارویی با دو یا چهار صفحه نیز متداول است. معمولاً صفحات بر سطح افق عمود است اما طول پره های پارویی بین ۵۰ تا ۸۰ درصد قطر داخلی ظروف است. پهنای پره پارویی ۶/۱ تا ۱۰/۱ طول آن است. [127]

انجام آزمایش و بررسی عملکرد هاضم

در این فصل برای تولید بیوگاز از دو نوع زیست توده در دسترس کود گاو شیری هلشتاین و اسب ترکمن استفاده شده است. و عوامل غلظت، میزان بارگزاری، روند اختلاط و تلفیق کود مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام اختلاط از پره پارویی در فاصله ۳/۱ از کف راکتور استفاده شد. و در ۷۰ دور در دقیقه تنظیم گردید. همچنین برای محاسبه مقدار ماده خشک ابتدا ۱۰۰۰ گرم از هر کود تازه در معرض گرما قرار گرفت تا کل رطوبت آن تبخیر شود و کاملاً خشک گردد. سپس ماده خشک به دست آمده وزن شد و درصد رطوبت آن محاسبه شد. برای کود تازه گاوی رطوبت ۸۰ درصد و کود اسب رطوبت ۶۵ درصد به دست آمد. نسبت C/N با ارسال نمونه به آزمایشگاه برای کود گاو شیری هلشتاین ۲۱ و کود اسب ۲۲,۵ ثبت شد و برای نمونه تلفیقی ۲۱,۵ لحاظ گردید.

روش ثبت و محاسبه داده ها:

- دما: دماسنج دیجیتال
- PH: PH سنج دیجیتال
- فشار مخزن: گیج فشار
- C/N: ارسال نمونه به آزمایشگاه
- درصد متان: ارسال نمونه به آزمایشگاه

- **حجم بیوگاز تولید شده :** خوراک دهی به هاضم ناپیوسته و حجم مخزن ثابت است (۵۰ لیتر)، حجم محفظه ذخیره گاز نیز ثابت می باشد. با توجه به فشار کم و زمان طولانی افزایش فشار می توان رفتار گاز ایده آل را برای بیوگاز تولید شده در نظر گرفت و حجم گاز تولید شده را بر اساس افزایش فشار در حجم ثابت محاسبه کرد.

$$PV = nRT$$

با در نظر گرفتن رفتار گاز کامل و جرم و حجم ثابت:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

P فشار (پاسکال) ، V حجم (لیتر)، N تعداد مول ها ، R ثابت گازها و T دما (سانتی گراد)

۸-۴ تولید بیوگاز از زیست توده در شرایط ترموفیلیک ۵۵

درجه سانتی گراد

۸-۴-۱ انتخاب زیست توده و شرایط هضم آن

برای انتخاب زیست توده مورد استفاده طبق بررسی ها و آمار منطقه، کود گاو شیری هلشتاین در کشور ایران از پتانسیل بسیار بالایی برخوردار است .

با توجه به بازهی بیشتر محیط ترموفیلیک و دوره ماند کمتر زیست توده جهت تولید بیوگاز، این محیط برای هضم فراهم شد. دمای محیط در فرایند ترموفیلیک طبق گزارش در دمای ۵۵ درجه بازدهی مطلوب تری داشته است. و افزایش درجه حرارت بالاتر از ۶۰ درجه سانتی گراد موجب کاهش و یا توقف تولید بیوگاز خواهد شد [128].

غلظت: با توجه به تحقیقات پیشین محتوای فاز جامد نباید از ۱۱ درصد بیشتر شود تحقیقات نشان داده که بهترین غلظت محلول برای هضم بی‌هوازی در مخازن بیوگاز و محیط ترموفیلیک ۷ تا ۹ درصد ماده جامد می باشد. [129]

شرایط اختلاط: اختلاط در خصوص دوره زمانی اختلات با توجه به نوع زیست توده و محیط آن متغیر می باشد [130]. ایجاد جریان‌های با سرعت بالا موجب توقف عملیات هضم می‌گردد. و در محیط مزوفیلیک سرعت اختلاط ۴۰ RPM و همزدن پیوسته زیست توده در راکتور بی‌هوازی تولید بیوگاز بیشتر بوده است. [100,131]

با جمع بندی موارد بالا از زیست توده گاو شیری نژاد هلشتاین در محیط ترموفیلیک ۵۵ درجه سانتی‌گراد و دوره اختلات هر ۴ ساعت به مدت ۵ دقیقه و سرعت اختلاط ۷۰ دور بر دقیقه، آزمایش اول انجام شد. یکی از مهم‌ترین عواملی که به طور مستقیم بر عملکرد بیوگاز تأثیر می‌گذارد، انتخاب و استفاده از تلقیح است که شامل گروه‌های مناسب میکروارگانیسم‌های قادر به تعامل با یکدیگر و قادر به سازگاری با شرایط مختلف محیطی است [132].

تولید بیوگاز پایدار و مؤثر در هضم بی‌هوازی با استفاده از تلقیح گیاهان عملکرد مناسب داشته ولی زمان بیشتری می‌برد. آزمایش‌های دسته‌ای مختلف نشان داده‌اند که استفاده از تلقیح از منشاء مختلف ممکن است کارایی فرایند متانیزاسیون یک بستر خاص (مثل ذرت، لجن فاضلاب و غیره) متفاوت باشد [133]. علاوه بر این، آزمایش‌های تلقیح آزمایشگاه تأیید کردند که استفاده از کنسرسيوم میکروبی سازگار می‌تواند سرعت شروع فرایند هضم را تسریع کند [134,135]. تزریق میکروبی سازگار ممکن است فرایند تخریب سیلوی ذرت را بهبود بخشد، که این امر با افزایش تولید گلوکز و اسیدهای چرب فرار و افزایش عملکرد تولید بیوگاز می‌گردد. نتایج انتخاب کنسرسيوم‌های هیدرولیتی همچنین نشان داد که زیست توده ورودی، بستر اصلی نیروی محرکه برای تغییرات در ساختار جامعه است [136-138].

برای تلقیح کود دامی با توجه به PH و نسبت C/N بالاتر کود اسب از کود گاو شیری هلشتاین، از

کود اسب به عنوان کود تلفیقی با کود گاو شیری می‌توان استفاده کرد.

۲-۸-۴ تولید بیو گاز از زیست توده گاو شیری نژاد هلشتاین

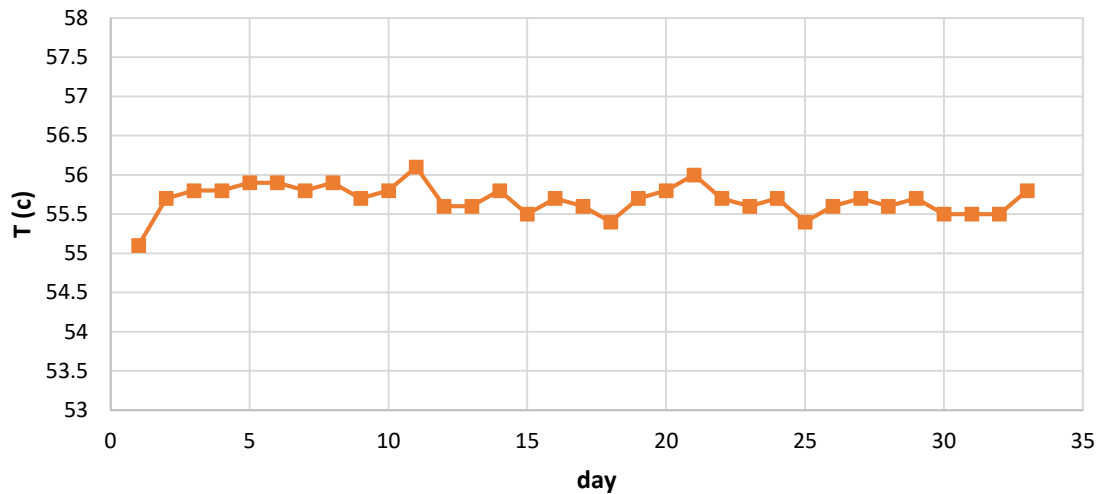
در این آزمایش از کود گاو شیری نژاد هلشتاین با رطوبت ۸۰ درصد استفاده شد. به منظور اندازه گیری رطوبت کود تازه و محاسبه ماده جامد طبق استاندارد ملی ۲۰۸۲۲-۲۰۱۶ ایران، ابتدا ۱۰۰۰ گرم کود تازه گاو وزن شد و با قراردادن در معرض حرارت تمام رطوبت آن گرفته و مجدداً وزن شد که به ۲۰۰ گرم کاهش یافته بود. در نتیجه ۸۰ درصد وزن آن را رطوبت تشکیل داده است. دمای راکتور ۵۵-۵۶ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید. نسبت C/N کود گاو هلشتاین ایران در محدوده ۲۰-۲۴ می‌باشد. و در آنالیز انجام شده در آزمایشگاه برای نمونه کود گاو شیری ۲۱ اندازه گیری شده است. PH به وسیله دستگاه PH سنج اندازه گیری و ۶٫۹۸ ثبت شد.

در بارگذاری مرتبه اول با توجه به نسبت مطلوب ماده خشک (۸٫۵ الی ۹ درصدی کود حیوانی نسبت به آب) مقدار ۲۲ کیلوگرم کود حیوانی (دارای ۴ کیلوگرم ماده خشک است) و با ترکیب با ۳۲ کیلوگرم (لیتر) آب نسبت ۸٫۵ درصد ماده خشک جهت تولید بیوگاز بررسی شد. و روند اختلاط هر ۴ ساعت به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۷۰ RPM انجام شد. (۶*۵*۷۰RPM/DAY) با توجه به دمای زیست توده در روند تولید گاز مشاهده شد عملیات هضم دمای زیست توده را تا ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش داد.

جدول ۳-۴ مشخصات اولیه آزمایش اول (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

نوع سوپسترا	غلظت	دما	PH	دوره اختلاط	C/N
کود گاو شیری	۸٫۵	۵۵ سانتی‌گراد	۶٫۹۸	۶*۵*۷۰RPM/DAY	۲۱

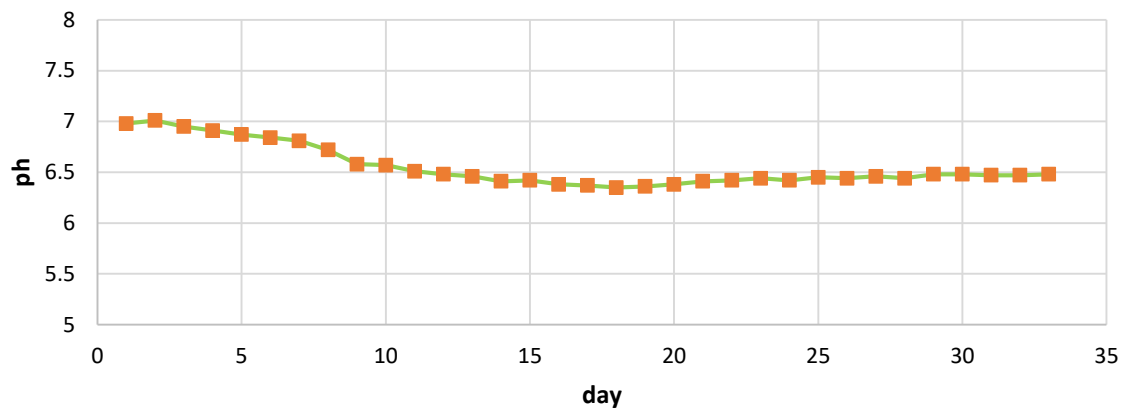
تغییرات دمای زیست توده در طول دوره



شکل ۴-۸ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

در کلیه آزمایش‌ها دمای زیست توده در محدوده ۵۵-۵۶ درجه سانتی‌گراد در هر روز ثبت و محیط ترموفیلیک ایجاد گردیده است. همان‌گونه که در شکل ۴-۸ نشان داده شد در روزهای اول واکنش گرمازا بوده و ۰,۵ - ۱ درجه سانتی‌گراد دمای سوبسترا از دمای تنظیم شده بالا تر بود. دمای هاضم به طور منظم پایش و در محدوده ترموفیلیک با کمترین تغییر ثبت گردید. نوسانات دما به دلیل بازه ۲ درجه ای عملکرد ترموستات تا حد امکان با پوشش عایق کنترل می‌گردد. و تغییرات چند دهم سانتی‌گراد قابل چشم پوشی است.

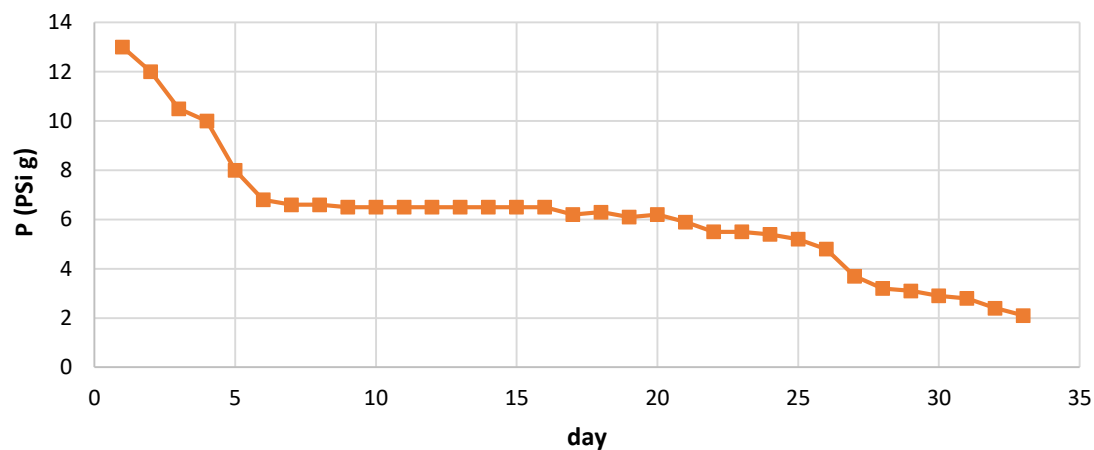
تغییرات PH زیست توده در هر روز



شکل ۴-۹ PH روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

با بررسی شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود که در ابتدا PH از عدد ۶,۹۸ تا ۶,۴۰ کاهش پیدا کرده و بعد از عبور مرحله اسید زایی PH تثبیت و به ۶,۶ افزایش پیدا می‌کند.

تغییرات فشار راکتور در هر روز

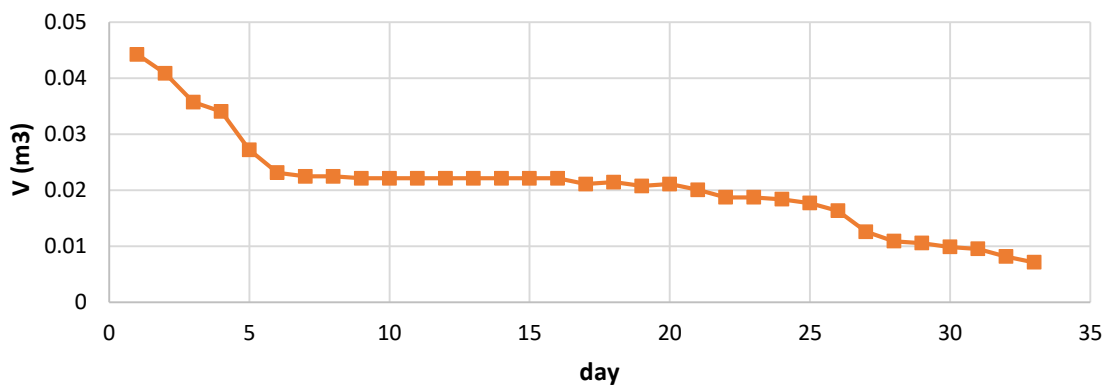


شکل ۴-۱۰ فشار روزانه مخزن در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

فشار بالا در روز های اول ناشی از خروج گاز های فرار می‌باشد که با کم شدن گاز های فرار تا روز ششم این روند نزولی و بعد تقریباً ثابت می‌شود. با توجه به شکل ۴-۱۰ بعد از روز ۲۱ تولید بیوگاز به تدریج کم

می‌شود و این به دلیل ثابت بودن مقدار سوبسترای تزریق شده است. (هاضم خوراک ناپیوسته).

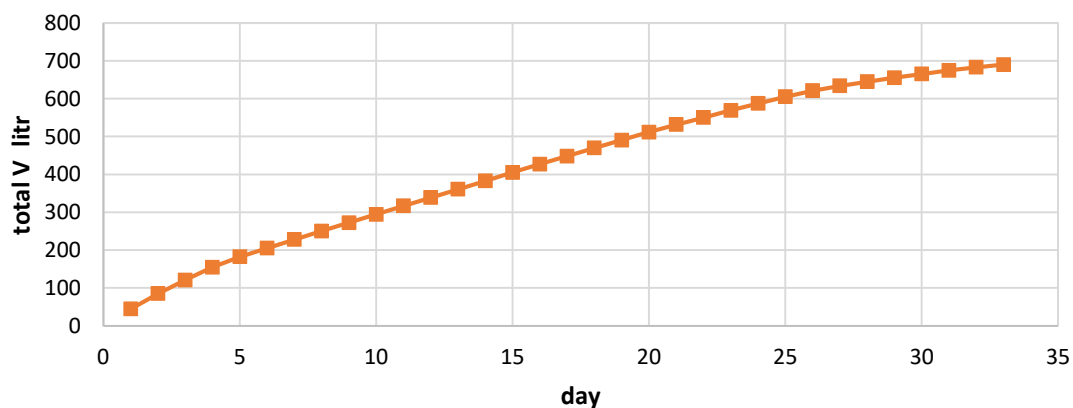
حجم گاز تولیدی در هر روز



شکل ۴-۱۱ حجم روزانه تولید گاز در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

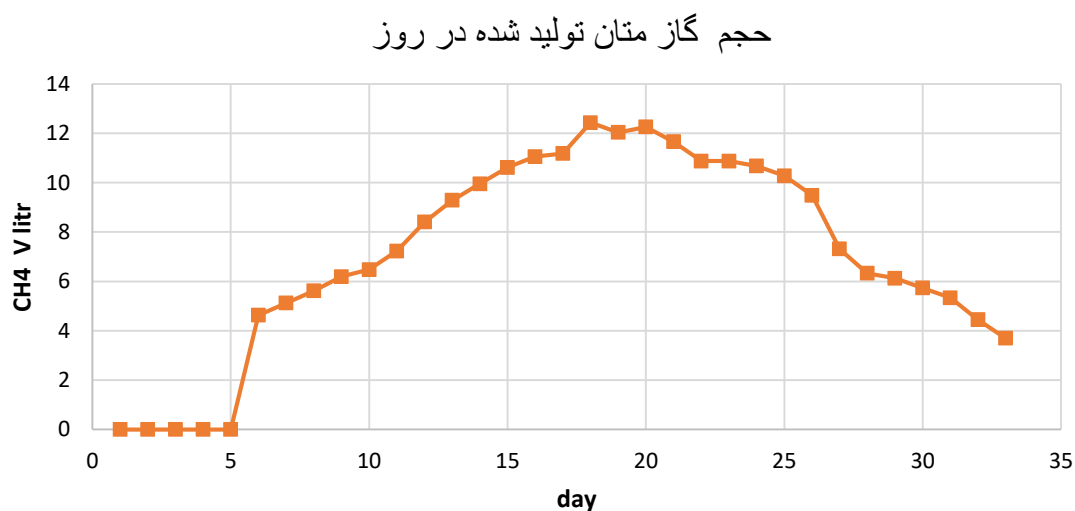
در شکل ۴-۱۱ و توضیحات شکل ۴-۱۰ میزان گاز های تولید شده در روز نشان داده شده است. گاز تولید شده در روز های اول با اینکه حجم بالایی دارد اما فاقد متان است. ابتدایی ترین روش بررسی وجود متان تست شعله است و تا روز ۶ اثری از احتراق در بیوگاز تولید شده مشاهده نگردید.

حجم کل گاز تولید شده



شکل ۴-۱۲ حجم تجمیعی بیوگاز در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

با توجه به شکل ۴-۱۲ حجم کل بیوگاز تولید شده در یک دوره ۳۳ روزه ۶۸۹ لیتر محاسبه شده است. با توجه به پتانسیل محاسبه شده در تحقیقات پیشین برای زیست توده کود گاوی به ازای هر کیلوگرم ماده جامد بین ۲۴۰-۲۵۰ لیتر بیوگاز استحصال می‌توان داشت. (جدول ۴-۱) و ما با داشتن ۴ کیلوگرم ماده خشک توانستیم حدود ۷۶۳ لیتر بیوگاز از ۹۶۰ لیتر بیوگاز را تولید کنیم. البته حدود ۲۵۰ لیتر گاز تولید نشده به دلیل توقف آزمایش در روز ۳۳ است. در حالی که هنوز بیوگاز در حال تولید بود و با توجه به روند نزولی و راندمان پایین این آزمایش متوقف شد.

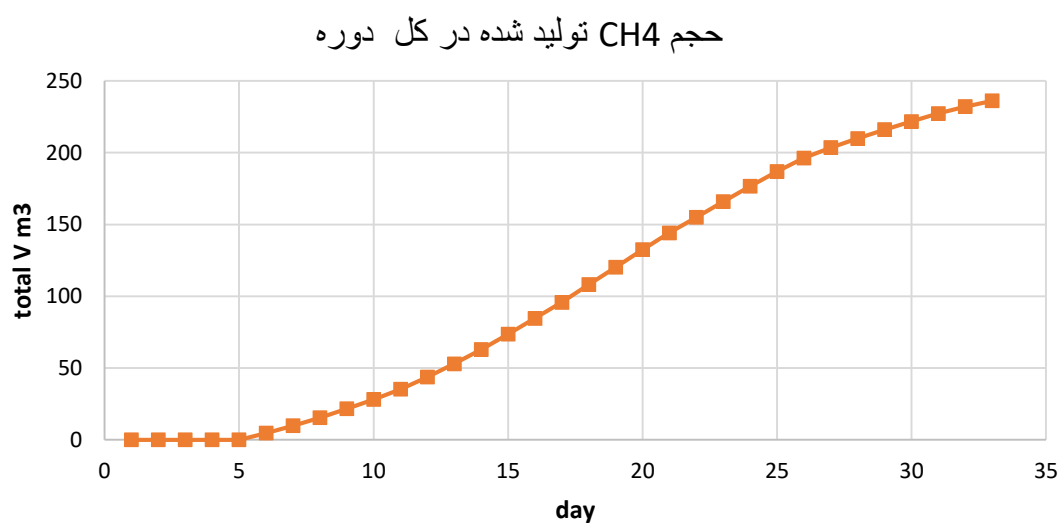


شکل ۴-۱۳ حجم گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

با توجه به شکل ۴-۱۳ حجم تولید گاز متان از روز ششم شروع و تا زمان هضم کامل سوبسترا ادامه داشت. نمونه‌های ارسالی به آزمایشگاه بیشترین درصد متان تولیدی در دوره ۳۴ روزه در روزهای ۱۸ تا ۳۰ انجام شده است. با اینکه تولید بیوگاز در روزهای ۷ تا ۲۱ ثابت بود درصد آن از روز ۶ تا ۱۸ از ۲۵ درصد تا ۵۸,۱ درصد افزایش یافت (روند صعودی نمودار) و از روز ۱۸ تا روز ۳۰ این درصد ثابت ماند اما با توجه به کاهش تولید بیوگاز به دلیل عدم تزریق سوبسترا تولید متان نیز به همان نسبت کاهش یافت. (روند نزولی نمودار)



شکل ۴-۱۴ تصویر شعله در روز ۲۲ (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)



شکل ۴-۱۵ حجم تجمیعی گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش اول شرایط نرمال-کود گاو شیری)

با توجه به اینکه درصد متان بیوگاز از ۲۳,۵ درصد تا ۵۸,۱ ثبت شد در کل دوره مقدار گاز متان تولید شده با خلوص ۱۰۰ درصد ۲۳۶,۱۶ لیتر محقق گردید.

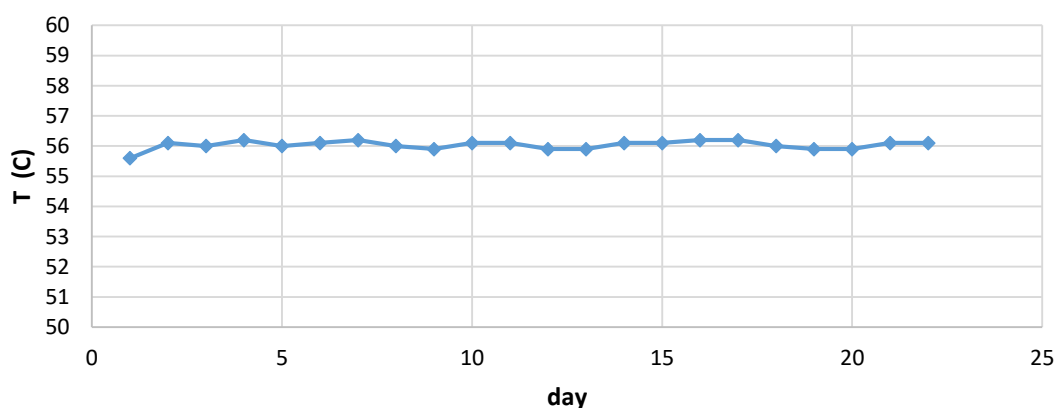
۳-۸-۴ اثر غلظت بر تولید بیو گاز از زیست توده گاو شیری

با توجه به حجم ۵۰ لیتری راکتور هاضم و نسبت ترکیب با آب هم یک به یک انجام و میزان ۲۸ کیلوگرم کود تازه با ۲۵ لیتر آب مخلوط و به هاضم تزریق شد. و به دلیل اینکه غلظت در این فرایند بالا بود (۱۳ درصد) نتایج به دست آمده صحت تاثیر غلظت در محیط ترموفیلیک را نمایان می سازد.

جدول ۴-۴ مشخصات اولیه آزمایش دوم (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

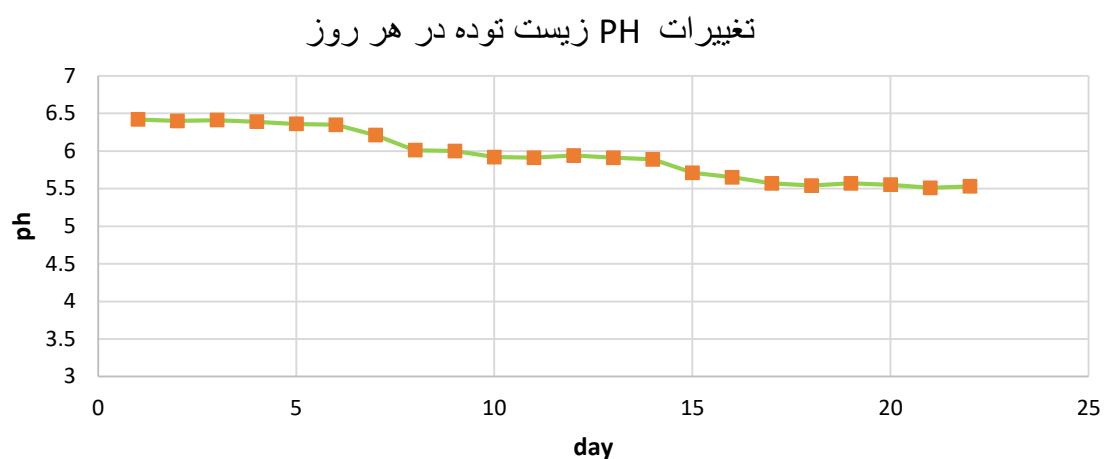
نوع سوپسترا	غلظت	دما	PH	دوره اختلاط	C/N
کود گاو شیری	۱۳	۵۵ سانتی گراد	۶,۴۲	۶*۵*۷۰ RPM/DAY	۲۱

تغییرات دمای زیست توده در طول دوره



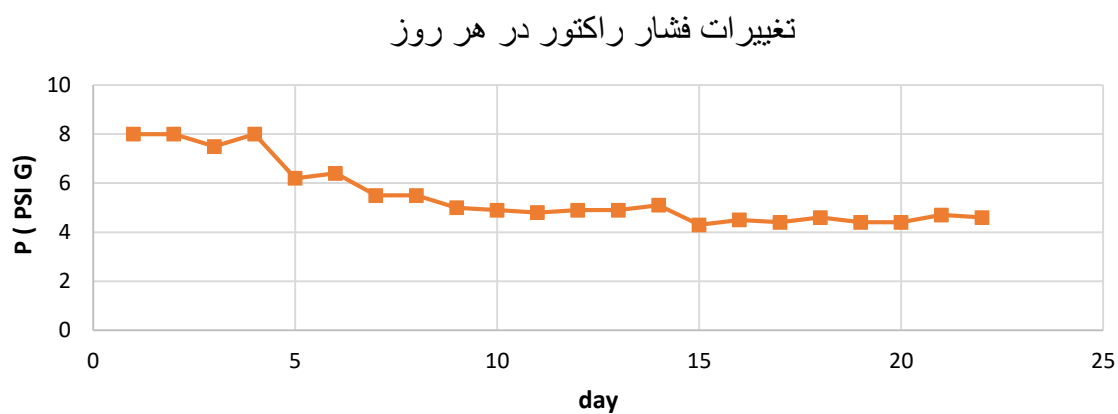
شکل ۴-۱۶ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند. (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

دمای فرایند هضم ۵۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۴-۱۶ شروع واکنش‌های گرماده، دمای مواد داخل مخزن از روز دوم حدود ۰,۵ درجه سانتی گراد بالا رفت و در دمای ۵۶ تثبیت یافت. این امر نشان دهنده توقف گرمادهی واکنش نیز بود. زیرا افزایش دما تا ۱,۵ درجه طبیعی است.



شکل ۴-۱۷ مقدار PH روزانه در دوره ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

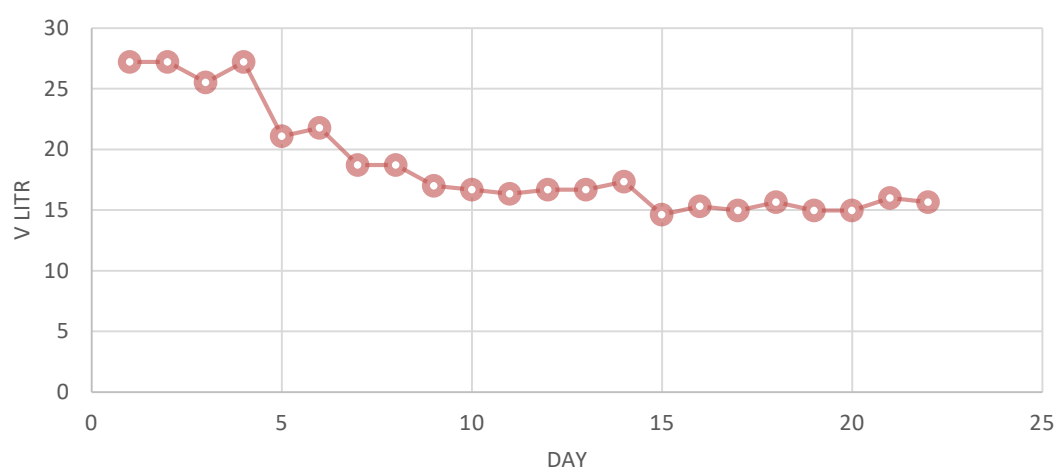
مطابق شکل ۴-۱۷ در ابتدا PH زیست توده ۶٫۴۲ ثبت شد و با گذشت زمان از روز چهارم روند کاهشی گرفت. به طوری که در روز دهم PH به زیر ۶ و در روز هجدهم به کمتر از ۵٫۵ رسید. و در همین محدوده تثبیت یافت. که این امر نشان دهنده آن است که فرایند استوژنز و متانوژنز به خوبی انجام نمی گیرد. زیرا PH افزایش نیافت.



شکل ۴-۱۸ مقدار فشار روزانه مخزن در دوره ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

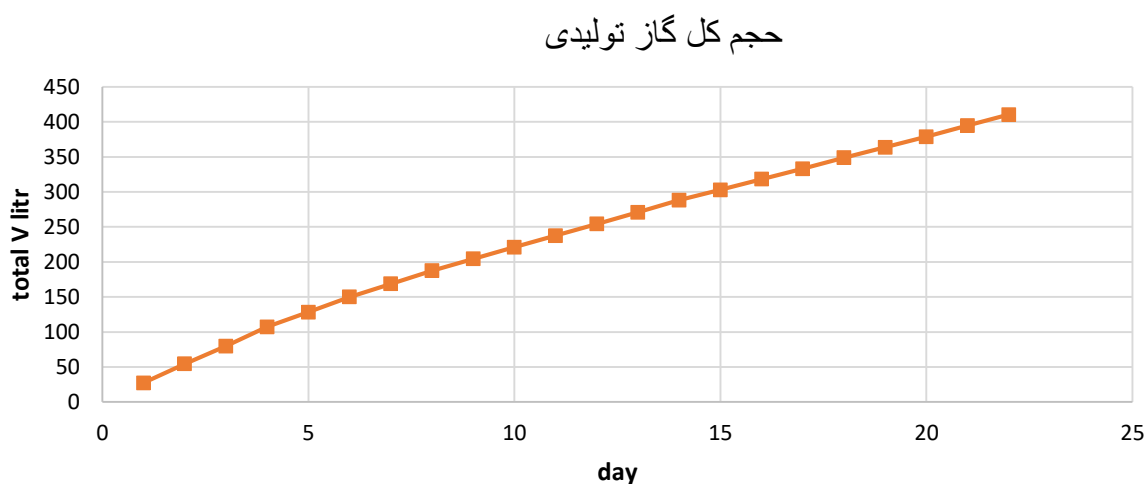
با توجه به برداشت‌های انجام شده و شکل ۴-۱۸ در خصوص فشار داخل مخزن در مدت زمان ۲۴ ساعت، بالاترین اعداد ثبت شده مربوط به روز های اول می‌باشد. خروج گاز های فرار از زیست توده در روز های اول صورت گرفته و تا فشار ۸ Psig فشار بالا رفت. و با گذشت زمان فشار نیز کاهش یافت. در روز نهم با خروج گازهای فرار و شروع متان‌زایی (به مقدار کم) فشار تثبیت یافت ولی زیست گاز تولید شده حتی قابلیت شعله ور شدن نداشت و درصد متان آن بسیار پایین بود.

حجم گاز تولیدی روزانه



شکل ۴-۱۹ حجم گاز تولیدشده در هر روز (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

همان‌طور که در شکل ۴-۱۹ مشخص است گاز تولید شده در روز های اول حجم زیادی دارد که نشان دهنده خروج گاز های فرار زیست توده می باشد. لازم به ذکر است در طول فرایند حجم گاز تولید شده الزاماً بیوگاز قابل اشتعال نیست زیرا تا زمانی که درصد متان تولیدی به بالای ۴۰ درصد نرسد اشتعال پایدار آن امکان پذیر نیست و در آزمایش دوم با گذشت ۲۱ روز فرایند متان زایی به درستی انجام نگرفت.



شکل ۴-۲۰ حجم تجمیعی گاز تولید شده در زمان ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

شکل ۴-۲۰ حجم کل گاز تولید شده در زمان ماند را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه حجم زیادی گاز تولید شده است کیفیت این گاز به درصد متان موجود در آن بستگی دارد.

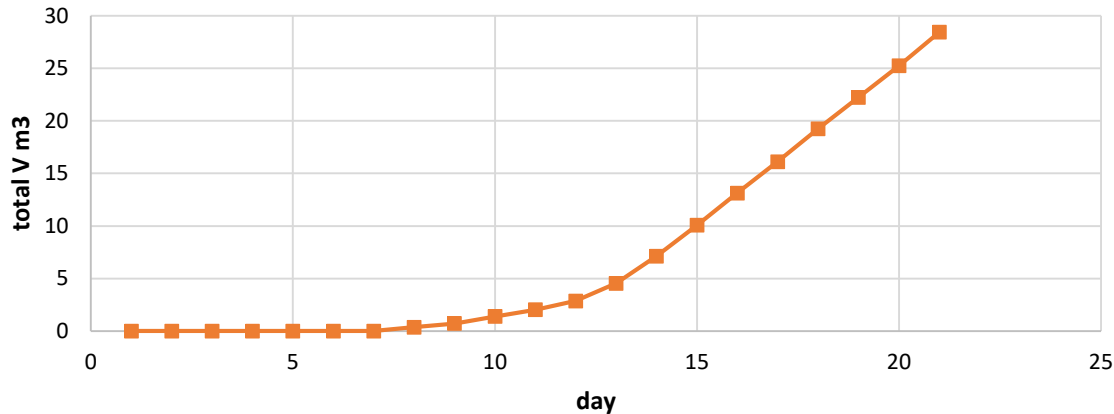


شکل ۴-۲۱ حجم روزانه گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

ارزش حرارتی آن در این نوع زیست گاز از متان موجود در آن حاصل می‌گردد. بعد از گذشت بیش از ۲۰ روز در صد متان بسیار پایین بود. ونمونه آزمایشگاه میزان آن را در بهترین روزها حدود ۲۰ درصد نشان

داد. (شکل ۴-۲۱) و شعله پایدار نیز تشکیل نشد.

حجم CH₄ تولید شده در کل دوره



شکل ۴-۲۲ حجم تجمیعی گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش دوم تاثیرات غلظت)

با توجه به شکل ۴-۲۲ درصد متان پایین در این آزمایش در کل روزهای ماند حدود ۳۰ لیتر گاز متان

تولید شد.

۴-۸-۴ اثر تغییر دور بر تولید بیو گاز از زیست توده گاو شیری

بارگذاری آزمایش سوم دقیقاً مطابق آزمایش اول انجام شد و با تغییر تعداد دفعات و افزایش دقایق همزدن

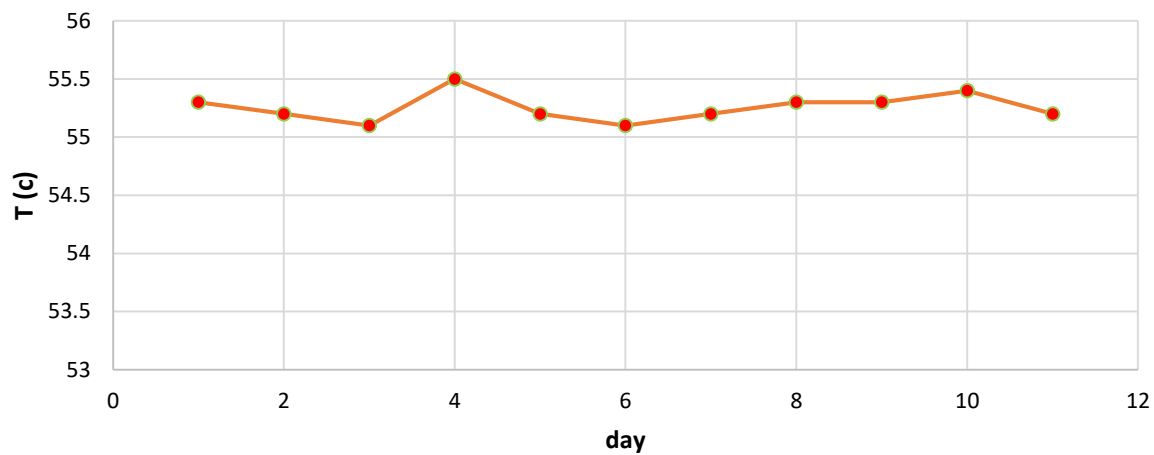
و اختلاط نتایج به دست آمده مطلوب نبود و در روز دهم متوقف گردید.

جدول ۴-۵ مشخصات اولیه آزمایش سوم (آزمایش سوم شرایط نرمال-کود گاو شیری)

نوع سوبسترا	غلظت	دما	PH	دوره اختلاط	C/N
کود گاو شیری	۸,۵	۵۵ سانتی گراد	۶,۶,۷۱	۱۲*۱۰*۷۰ RPM/DAY	۲۱

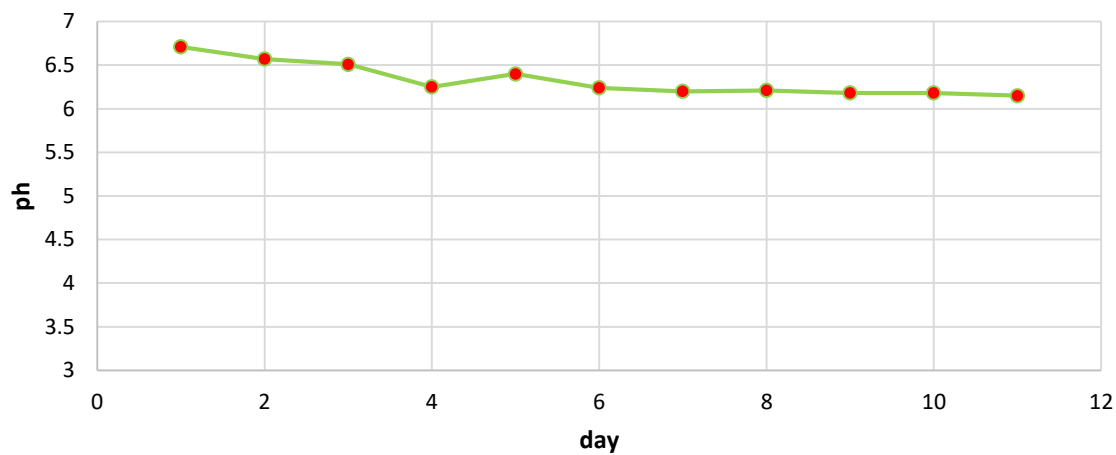
در آزمایش سوم تغییرات دما در محدوده ۵۵-۵۵,۵ درجه سانتی گراد بود (شکل ۴-۲۳)

تغییرات دمای زیست توده در طول دوره



شکل ۴-۲۳ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری)

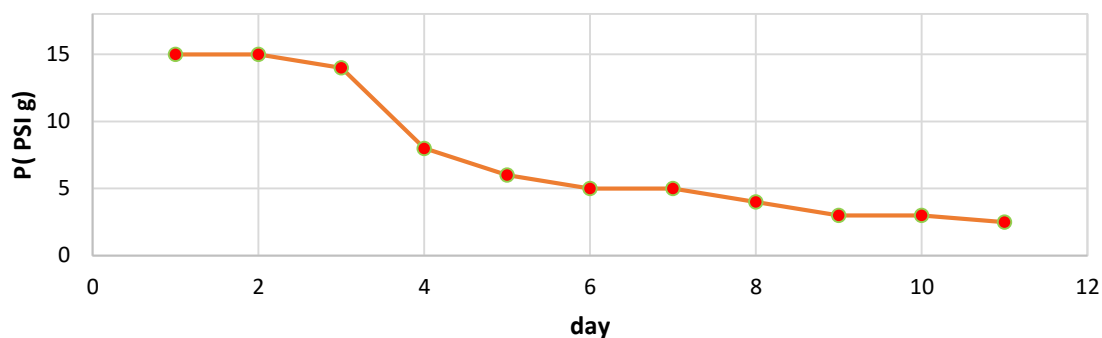
تغییرات PH زیست توده در هر روز



شکل ۴-۲۴ PH روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری)

شکل ۴-۲۴ تغییرات PH روند اسیدزایی مطلوب را نشان می‌دهد اما با تداوم این روند کاهشی و عدم شروع فاز متان زایی اختلال در روند هضم مشاهده گردید.

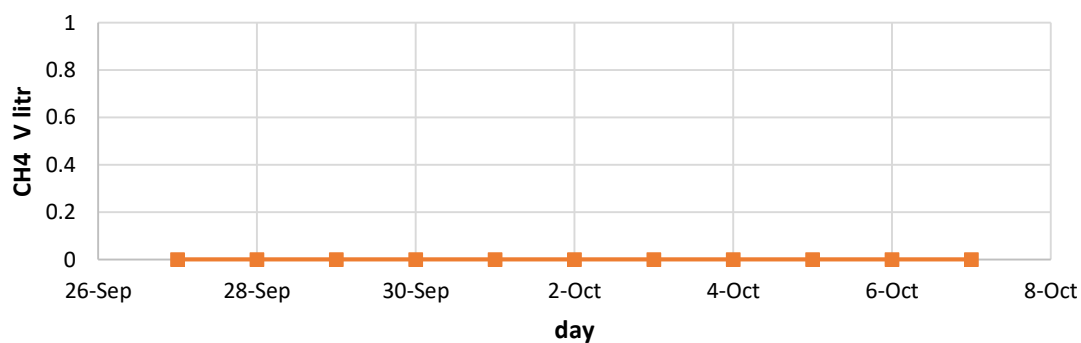
تغییرات فشار راکتور در هر روز



شکل ۴-۲۵ فشار روزانه مخزن در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری)

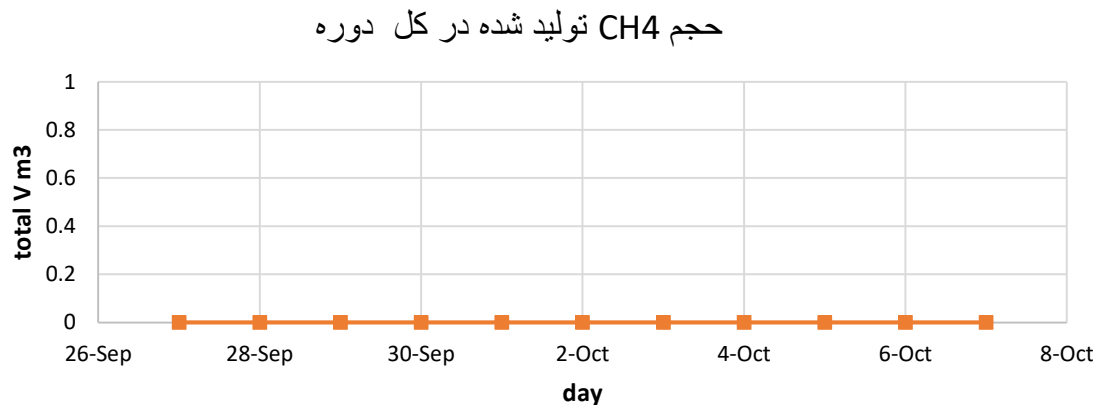
مطابق شکل ۴-۲۵ فشار بالای مخزن در روز های اول خروج گازهای فرار را نشان می دهد و بیشتر کردن دفعات هضم و مدت زمان خروج گاز های فرار را کاهش می دهد و در بالا بردن خلوص متان در بیوگاز موثر است. با اینکه در طول فرایند تولید زیست گاز مشهود است اما به دلیل درصد بسیار پایین متان قابلیت اشتعال ندارد.

حجم گاز متان تولید شده در روز



شکل ۴-۲۶ حجم گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری)

باتوجه به شکل ۴-۲۶ زیست گاز تولید شده فاقد متان است، این موضوع نشان می‌دهد با اینکه مرحله حذف گازهای فرار و اسیدزایی به خوبی انجام شد ولی برگشت به فاز متان‌زایی صورت نگرفت و این امر به دلیل افزایش مدت زمان اختلاط و تعداد دفعات آن بود.



شکل ۴-۲۷ حجم تجمیعی بیوگاز در زمان ماند (آزمایش سوم تغییر دور همزن-کود گاو شیری)
(توضیحات مانند شکل ۴-۲۶)

۵-۸-۴ تولید بیوگاز از زیست توده تلفیقی (کود گاو شیری و اسب)

در شرایط ترموفیلیک

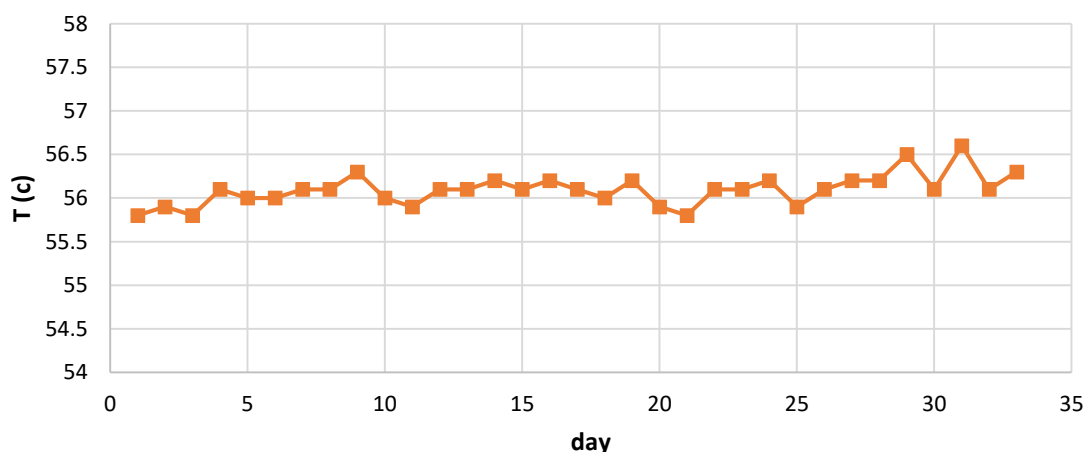
در این آزمایش از تلفیق کود گاو و کود اسب استفاده شد. این ترکیب شامل ۲۵ درصد کود اسب نژاد ترکمن و ۷۵ درصد کود گاو شیری نژاد هلشتاین می‌باشد. درصد رطوبت کود گاو ۸۰ درصد است و کود اسب دارای رطوبت ۶۵ درصد اندازه گیری شد. و با ترکیب ۱۶,۵ کیلوگرم کود گاو و ۴,۵ کیلوگرم کود اسب و ۳۲ کیلوگرم آب در دمای ۵۵ درجه نتایج زیر به دست آمد.

جدول ۴-۶ مشخصات اولیه آزمایش چهارم (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

نوع سوبسترا	غلظت	دما	PH	دوره اختلاط	C/N
کود گاو شیری	۸,۵	۵۵ سانتی گراد	۷,۷۳	۶*۵*۷۰ RPM/DAY	۲۱,۵

با اینکه دمای هاضم در ۵۵ درجه تنظیم بود واکنش گرما زا بوده و دمای سوبسترا تا ۵۶,۵ درجه افزایش یافت . لازم به ذکر است با افزایش دمای تنظیم شده به ۵۶ دمای سوبسترا هم ۰,۵ درجه افزایش یافت. و برای جلوگیری از اختلال در روند طبیعی هضم ترموفیلیک با ثابت نگه داشتن دمای دستگاه هاضم در ۵۵ درجه و دمای سوبسترا در ۵۷ درجه آزمایش انجام شد.

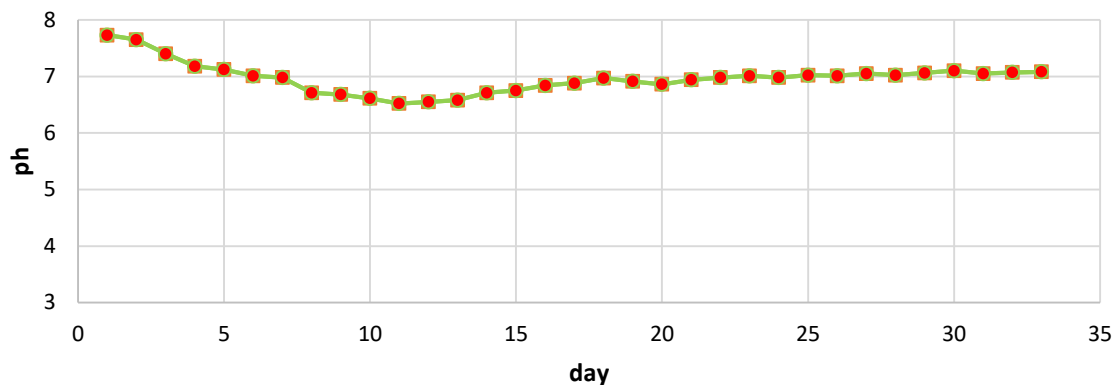
تغییرات دمای زیست توده در طول دوره



شکل ۴-۲۸ دمای روزانه زیست توده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

در شکل ۴-۲۸ مشاهده شد در روز دوم به بعد دمای سوبسترا حدود ۱,۵ درجه از دمای آب بالاتر رفت و این نشان از گرمادوست بودن این تلفیق می دهد. دمای هاضم در کانال ۵۶ درجه سانتی گراد ثابت بود.

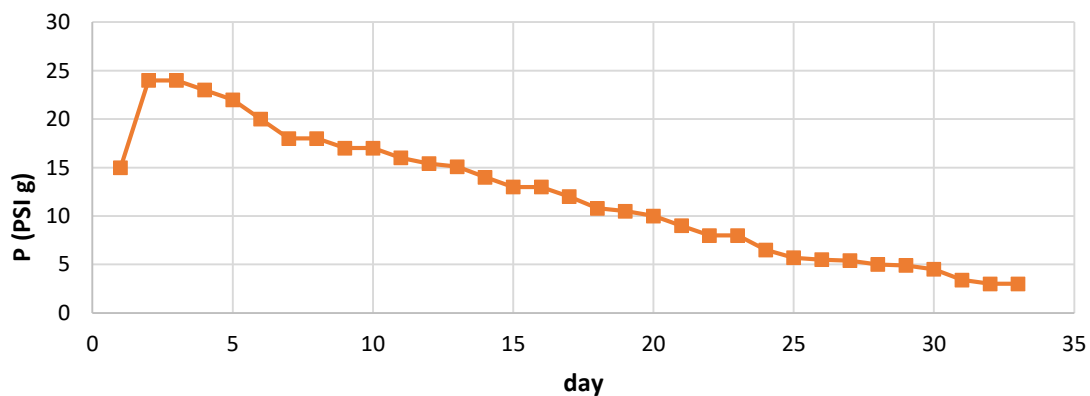
تغییرات PH زیست توده در هر روز



شکل ۴-۲۹ مقدار PH روزانه در دوره ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

همان گونه که در شکل ۴-۲۹ مشخص است PH سوبسترای تلفیق شده در شروع آزمایش ۷,۷ ثبت گردید و با گذشت زمان در محیط ترموفیلیک تا محدوده ۶,۵ کاهش یافت و بعد از روز ۱۲ فاز اسیدزایی به اتمام رسید و PH افزایش یافت. و این روند مناسب این مرحله را نشان داد و شروع متانزایی در روزهای نخست قابل توجه است.

تغییرات فشار راکتور در هر روز



شکل ۴-۳۰ مقدار فشار روزانه مخزن در دوره ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

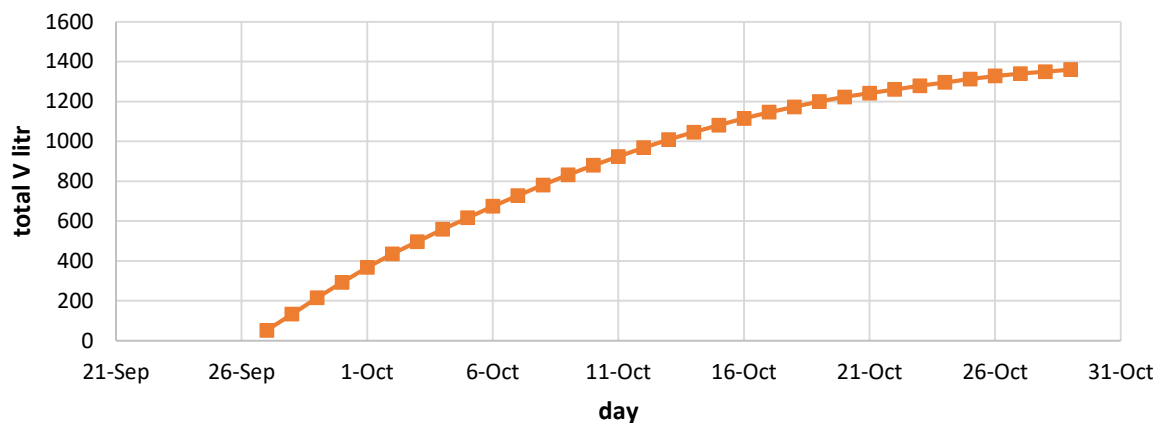
در شکل ۴-۳۰ با شروع واکنش‌های گرمادوست مشاهده شد در روز دوم حجم زیاد گاز های فرار خارج شدند و حجم زیست گاز تولید شده نیز قابل توجه بود. بعد از گذشت زمان به مرور از حجم گاز تولیدی کاسته شد و شعله تا روز های پایانی از کیفیت مناسبی برخوردار بود.



شکل ۴-۳۱ حجم گاز تولید شده در هر روز (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

شعله‌ور شدن بیوگاز در روز ششم و تثبیت شعله در روز دهم با خلوص بالا و حجم زیاد ۸۱,۶ لیتر بیوگاز نشان داد ترکیب کود گاوی و کود اسب به نسبت ۳-۱ در محیط ترموفیلیک بازدهی خوبی دارد. (شکل ۴-۳۱). در روزهای اول مقدار عمده گاز تولید شده گازهای فرار هستند که بیوگاز تولیدی قابل اشتعال نیست اما از روز ششم شعله های بی ثبات تشکیل می گردید و بعد از روز ششم شعله قرمز رنگ با ثبات بهتر به وجود آمد که درصد متان آن ۲۱,۳ تا ۳۵ درصد افزایش و حجم بیوگاز تولید شده ۶۰ لیتر کاهش داشت. در روز ۱۱ این درصد به ۵۰,۱ درصد و روز ۱۸ به ۶۲,۴ درصد افزایش یافت و تا روزهای آخر ثابت ماند. اما حجم تولیدی به مرور کاهش یافت و در روزهای آخر به حدود ۱۰ لیتر رسید.

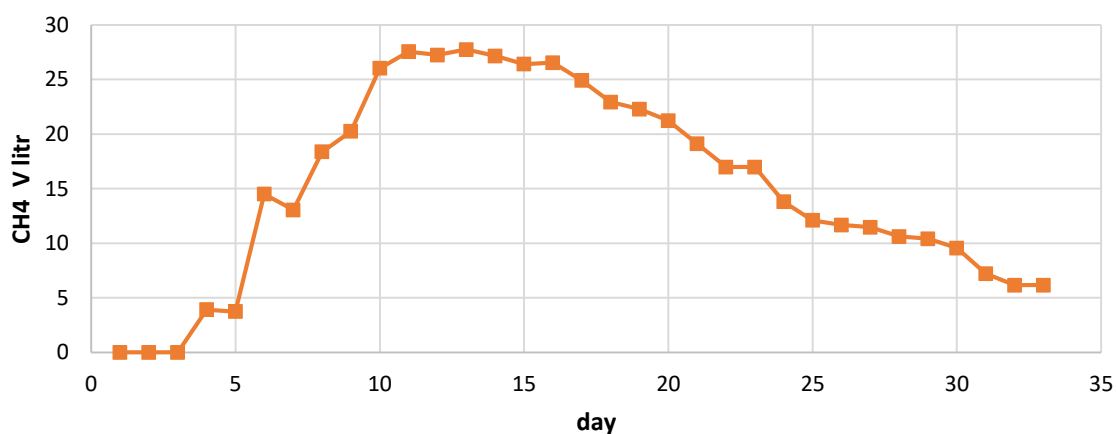
حجم گاز تولید شده در کل دوره



شکل ۴-۳۲ حجم تجمیعی گاز تولید شده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

مطابق شکل ۴-۳۲ حجم گاز تولید شده در دوره ۳۳ روزه به ۱۳۶۰ لیتر رسید. که در مقایسه با آزمایش اول تولید دو برابری را نشان می دهد. البته در روزهای اول حجم ۳۷۸ لیتر فاقد متان بوده و از بخار آب و گازهای فرار تشکیل شده است.

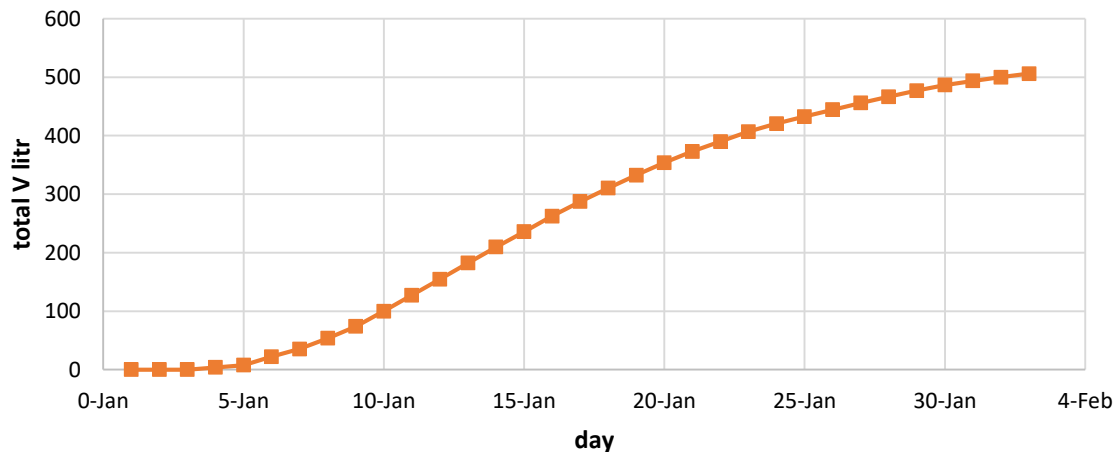
حجم گاز متان تولید شده در روز



شکل ۴-۳۳ حجم روزانه گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

با ارسال نمونه در روز ۱۷ با خلوص ۵۰,۶ و از روز ۲۴ به بعد خلوص ۶۲,۴ درصد متان ثبت گردید. که این روند تا روز ۳۱ با همین خلوص ادامه داشت و در روز ۳۲ و ۳۳ با کاهش ۲ درصدی به خلوص ۶۰,۱ درصد رسید. بیشترین حجم تولید گاز متان در روز ۱۳ با تولید ۲۸ لیتر به ثبت رسید.

حجم کل متان تولید شده در کل دوره



شکل ۴-۳۴ حجم تجمیعی گاز متان تولید شده در زمان ماند (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)

با توجه به شکل ۴-۳۴ حجم کل گاز متان تولید شده به ۵۰۶ لیتر رسید. که ۱۰۰ لیتر در بیوگازهای ۲۳ درصد متان، ۱۳۶ لیتر در بیوگازهای بالای ۵۴ درصد متان و ۲۷۰ لیتر متان در بیوگازهای دارای خلوص ۶۲ درصد متان به دست آمد.



شکل ۴-۳۵ تصویر شعله در روز ۱۶ (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)



شکل ۴-۳۶ تصویر شعله در روز ۲۴ (آزمایش چهارم تاثیرات تلفیق کود گاو و اسب)



شکل ۴-۳۷ دستگاه هاضم

۶-۸-۴ اعتبار سنجی

پتانسیل انواع زیست توده برای تولید بیوگاز در جدول ۴-۱ آورده شده است. وبا مقایسه با جدول ۴-۲ دستگاه هاضم ساخته شده قابلیت تولید حداکثر میزان تولید بیوگاز را دارا می‌باشد.

آزمایش اول با تولید بیش از ۱۹۰ لیتر تا روز ۳۳ (قبل از توقف کامل فرایند تولید بیوگاز) و با ۵۸,۱ درصد متان و در آزمایش چهارم با تولید ۳۴۰ liter/kg بیوگاز با خلوص ۶۲,۴ درصد متان اعتبار آزمایش ها و عملکرد خوب دستگاه هاضم را نشان می‌دهد.

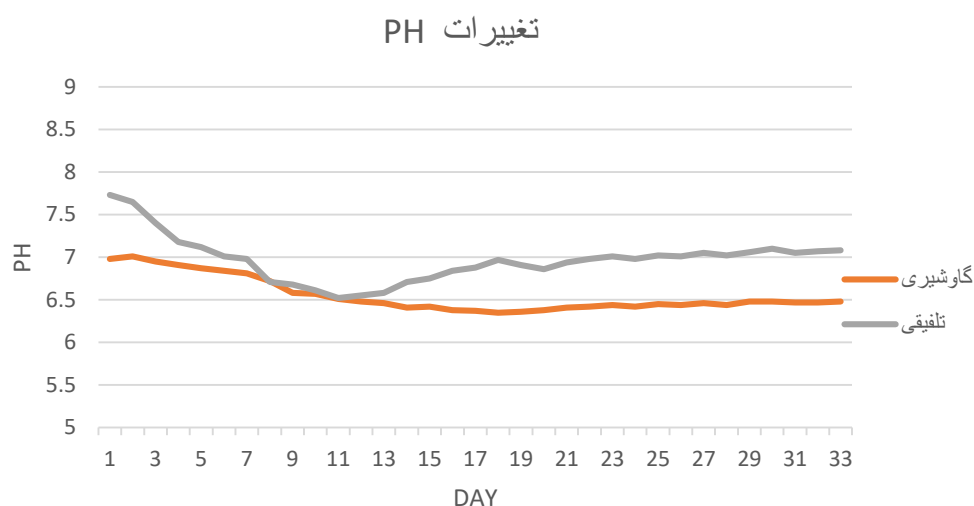
جدول ۴-۱ پتانسیل تولید بیوگاز در انواع کود دامی [125,126]

مواد زیست تجدید پذیر	بیوگاز قابل استحصال (Litr/Kg)	درصد متان موجود در بیوگاز
کود گاو	۲۶-۲۸	۵۰-۶۰
کود گوسفند	۲۲-۲۴	۴۰-۵۰
کود اسب	۲۰-۳۰	۵۰-۶۰
کود بز	۴۰-۶۰	۵۰-۶۰

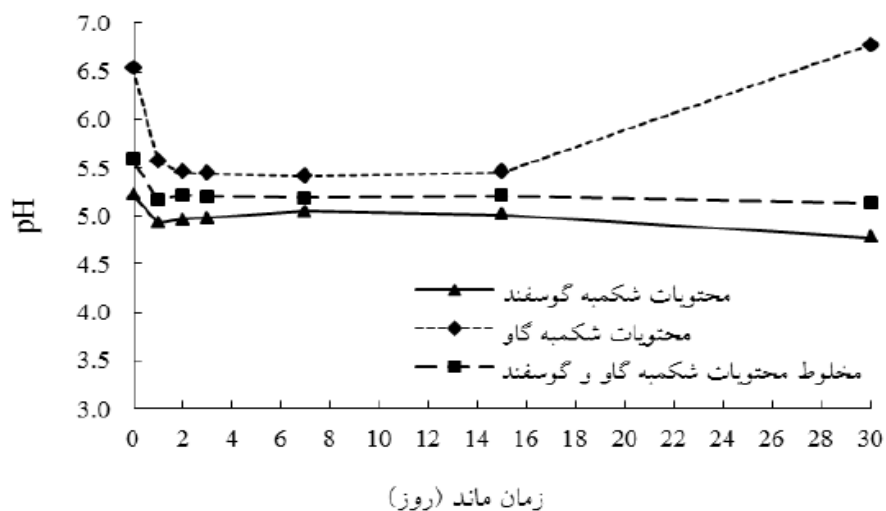
جدول ۴-۷ تولید بیوگاز در آزمایش های انجام شده

شرح آزمایش	مواد زیست تجدید پذیر	بیوگاز استحصال شده (Litr/Kg)	درصد متان موجود در بیوگاز
آزمایش اول شرایط مطلوب و پایه	کود گاو شیری هلشتاین	۲۳-۳۱	۳۰-۵۸
آزمایش دوم تغییر غلظت	کود گاو شیری هلشتاین	-	۲۰-۰
آزمایش سوم تغییر روند اختلاط	کود گاو شیری هلشتاین	-	۰
آزمایش چهارم تلفیق کود گاو با کود اسب	کود گاو شیری هلشتاین و کود اسب	۳۰-۳۳	۵۰-۶۲,۱

همچنین با مقایسه نمودار PH در شکل ۴-۳۸ که نشان دهنده روند هضم در هر مرحله است با نمودار PH در تحقیقات آمنه سلیمی و همکاران [139] شکل ۴-۳۹ درست بودن روند هضم را خواهیم دید.



شکل ۴-۳۸ مقایسه PH در زمان ماند در کود گاوشیری و کود تلفیقی کود گاو و اسب

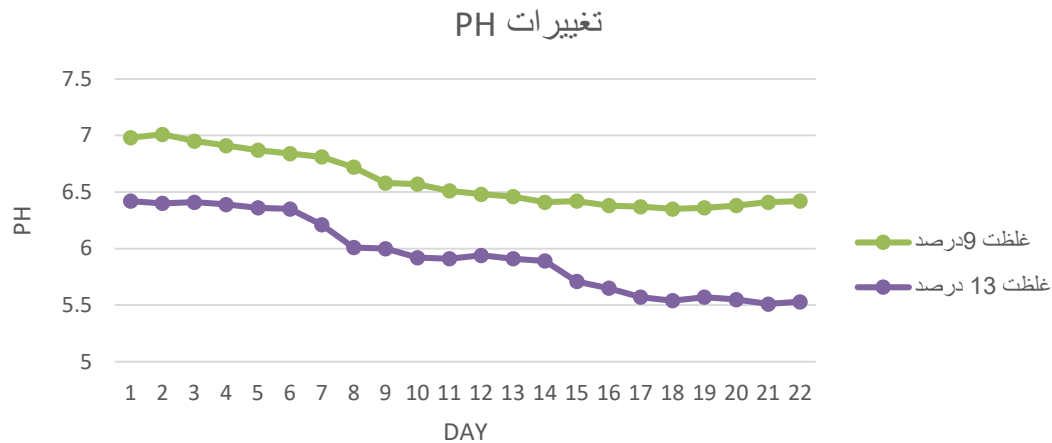


شکل ۴-۳۹ مقایسه PH در زمان ماند در محتویات شکمبه گاو و گوسفند [139]

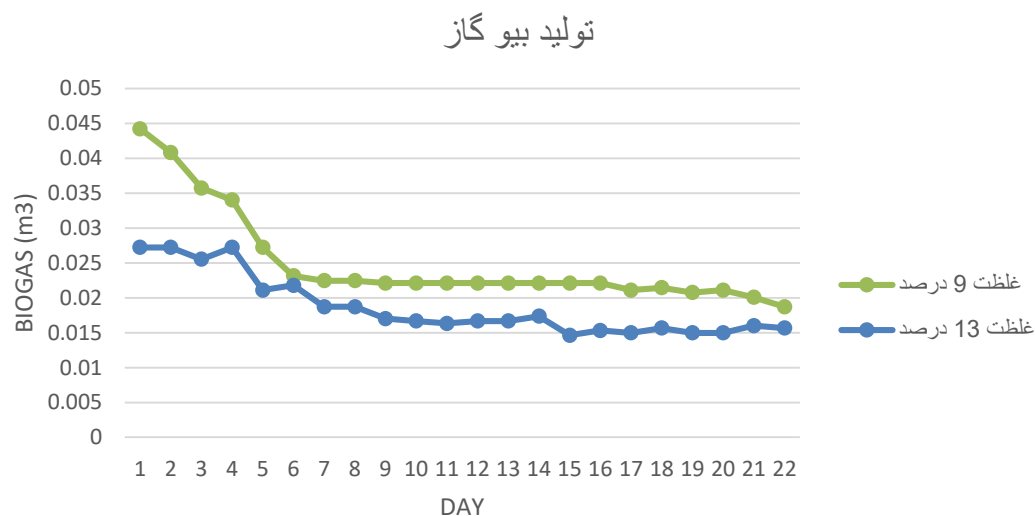
۴-۸-۷ تاثیر غلظت

با توجه به آزمایش اول و دوم مطابق شکل ۴-۴ و ۴-۱۱ تاثیر غلظت سوبسترا در فرایند متان‌زایی بسیار مشخص است. در آزمایش اول غلظت مواد جامد ۸٫۵ درصد و عملکرد دستگاه هاضم طبیعی بود و زمان و روند هر یک از مراحل هضم به درستی روی داد. اما در آزمایش دوم با غلظت ۱۳ درصد ماده جامد اختلالاتی

در زمان ماند و روند اسید زایی رخ داد که با کاهش زیاد PH منجر شد. مطابق با شکل ۴-۴ و این امر در فرایند هضم بی‌هوازی در محیط ترموفیلیک باعث توقف متان‌زایی می‌گردد. (شکل ۴-۴۱ و ۴-۴۲)



شکل ۴-۴۱ مقایسه PH در زمان ماند در غلظت های ۹ و ۱۳ درصد مواد جامد

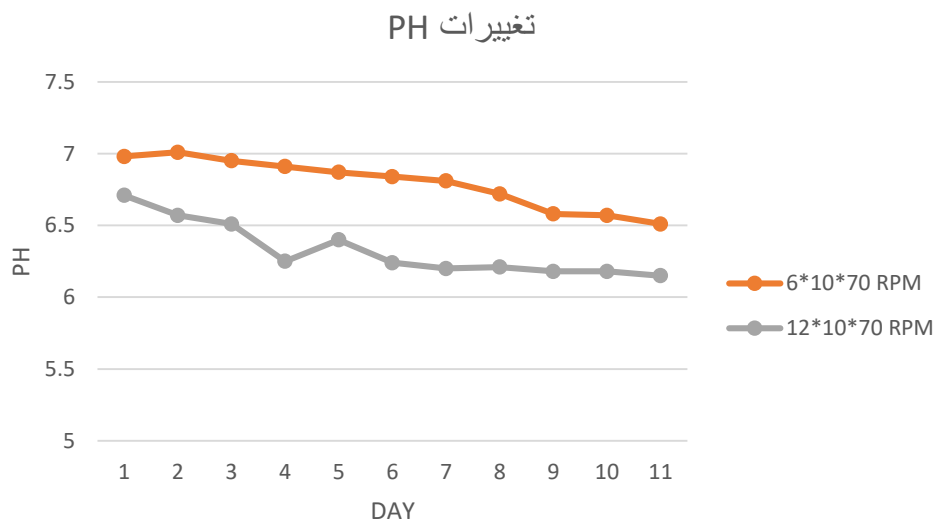


شکل ۴-۴۲ مقایسه حجم بیوگاز تولید شده در غلظت های ۹ و ۱۳ درصد مواد جامد

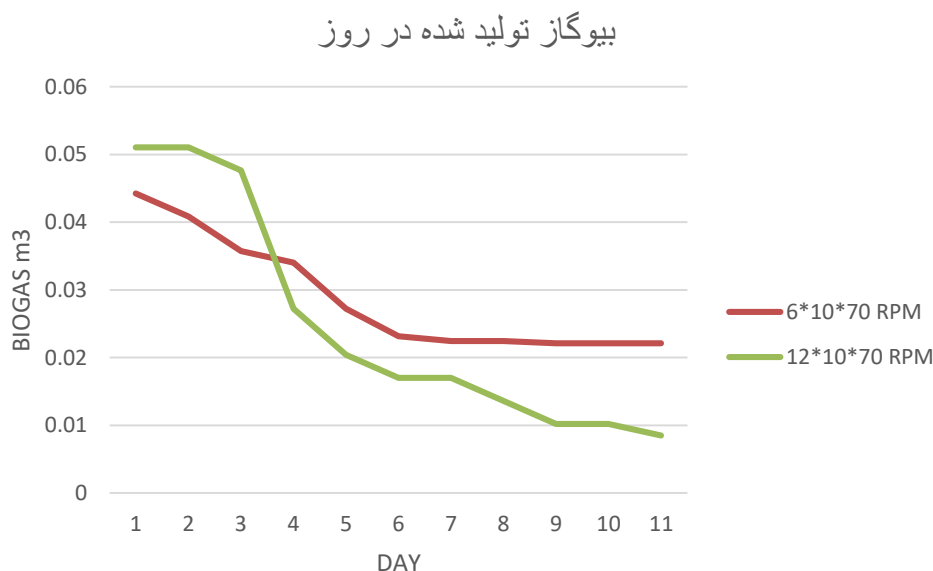
۸-۸-۴ تاثیر اختلاط

مدت زمان اختلاط و دفعات تکرار آن در دوره تاثیرات قابل توجهی دارد. با انجام آزمایش سوم این نتیجه به دست آمد که تعداد دفعات همزدن سوپسترا بایست کنترل گردد. با زیاد شدن دفعات همزدن فرایندهای

هضم به خوبی انجام نمی‌گیرد. و تنها خروج گاز های فرار را تسریع می بخشد. (شکل ۴-۴۴) بالا بردن دفعات و مدت زمان هم زدن از هر ۶ ساعت ده دقیقه با سرعت ۷۰ RPM به هر دو ساعت ده دقیقه با هن دور در آزمایش سوم منجر به اختلال در روند هضم گردید. که در شکل ۴-۴۴ و ۴-۴۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۴۳ مقایسه PH در زمان ماند در تعداد و زمان اختلاط کود گاو شیری

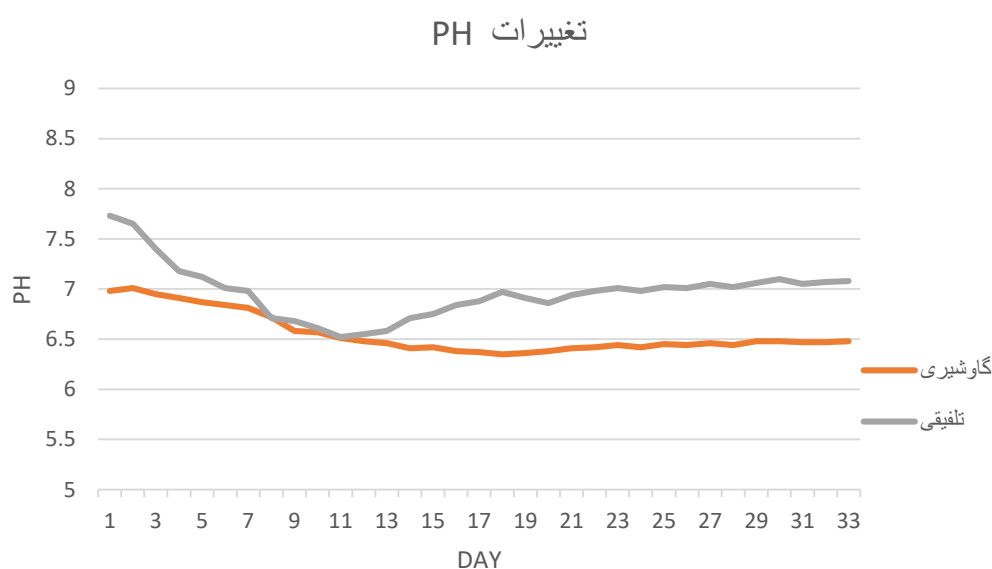


شکل ۴-۴۴ مقایسه حجم بیوگاز تولید شده در تعداد و زمان اختلاط کود گاو شیری

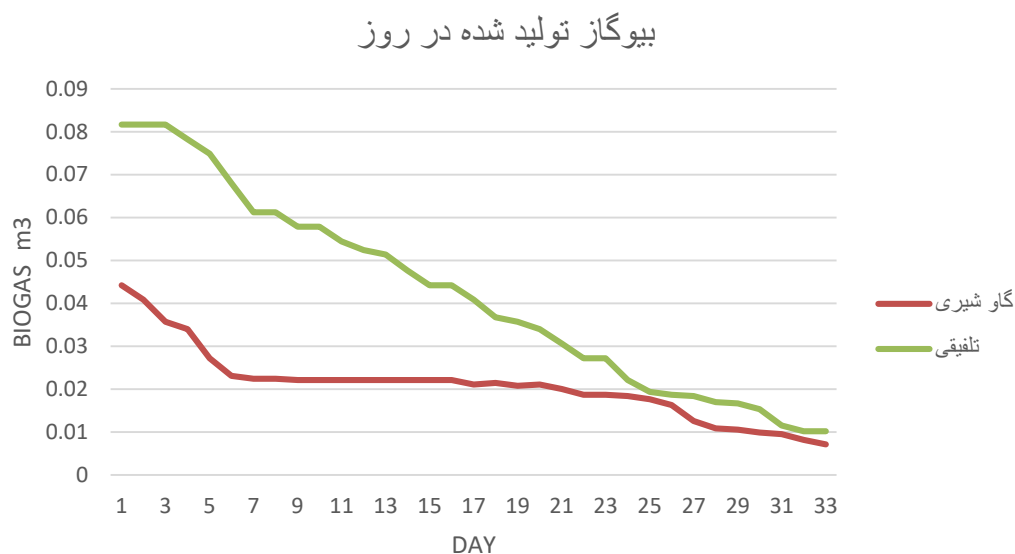
۹-۸-۴ تاثیر تلفیق

با تطبیق شکل های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ و ۴-۱۳ در آزمایش دوم با شکل های ۴-۲۲ و ۴-۲۳ و ۴-۲۴ در آزمایش چهارم با تلفیق کود گاو شیری و کود اسب تغییراتی در PH و سریع تر آغاز شدن روند هضم مشاهده گردید. و متانزایی نیز زود شروع شد. همچنین واکنش های آن گرمزایی بیشتری نسبت به آزمایش های قبل داشت. و میزان تولید بیوگاز ۷۰ درصد و تولید متان در بیوگاز ۳ درصد افزایش یافت. (شکل های ۴-۴۵ و

(۴-۴۶)



شکل ۴-۴۵ مقایسه PH در زمان ماند در کود گاو شیری و کود تلفیقی کود گاو و اسب



شکل ۴-۴۶ مقایسه حجم بیوگاز تولید شده در کود گاوی شیری و کود تلفیقی کود گاوی و اسب

در آزمایش ها تاثیر عواملی چون غلظت بالا، نحوه اختلات در حین فرایند و تلفیق کود دامی در محیط ترموفیلیک مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش اول با غلظت ۸,۵ درصد ماده جامد، اختلاط در دوره های ۴ ساعته به مدت ۵ دقیقه و شرایط مناسب در محیط ترموفیلیک با کود گاوی شیری نژاد هلشتاین انجام شد. و نتایج به دست آمده با تولید بیوگاز ۵۸,۱ درصد متان مطلوب بود. در آزمایش دوم غلظت مواد جامد را بالا بردیم و تا ۱۳ درصد ماده جامد تزریق نمودیم و باقی شرایط همانند آزمایش اول لحاظ گردید. که تاثیرات مخرب آن در مرحله اسیدزایی مشاهده شد و فرایند متان زایی را مختل نمود. درصد متان در این آزمایش از ۲۰ درصد تجاوز نکرد. در آزمایش سوم با بالا بردن دفعات و مدت زمان همزدن هر دوساعت به مدت ۱۰ دقیقه شاهد تسریع در خروج گازهای فرار بودیم ولی همزدن زیاد موجب اختلال در مرحله اسید زایی شد و سوبسترا وارد مرحله متان زایی نشد و زیست توده تولیدی گاز متان نداشت. در آزمایش چهارم تلفیق کود گاوی شیری هلشتاین (۷۵ درصد) با کود اسب ترکمن (۲۵ درصد) نسبت ۳ به ۱ انجام شد. کلیه

شرایط مانند اختلاط و غلظت و... مانند آزمایش اول لحاظ گردید. که در آن درصد متان تا ۶۲,۴ درصد بالا

رفت و نسبت به آزمایش اول ۴ درصد افزایش را نشان داد.

فصل 5 : نتیجه گیری

، جمع بندی و پیشنهادها

نتیجه گیری

ساخت دستگاه هاضم با عملکرد مناسب تحقق یافت. و دریافتیم محیط ترموفیلیک زمان ماند را کوتاه و خلوص بیوگاز را افزایش می دهد. غلظت در محیط های ترموفیلیک نباید بیشتر از ده درصد ماده جامد باشد زیرا این امر مرحله اسیدزایی و متان زایی را مختل می کند. همچنین اختلاط زیاد و بیش از اندازه باعث مختل شدن فرایند تولید بیوگاز می شود، همچنین تلفیق زیست توده کود گاو شیری نژاد هلشتاین و کود اسب نژاد ترکمن بازدهی بالایی دارد. می توان با ترکیب انواع زیست توده با نسبت های مختلف و بالا بردن PH و C/N به بیوگاز هایی با درصد متان خوب دست یافت.

پیشنهاد ها

۱. با توجه به پتانسیل بالای منطقه و کشور در تامین زیست توده کود گاو پیشنهاد می شود ترکیبات تلفیقی کود گاو با دیگر زیست توده ها بسته به نوع منطقه مورد آزمایش قرار گیرد.
۲. با توجه به آزمایش سوم و تاثیر اختلاط بر خروج زود هنگام گازهای فرار پیشنهاد می شود در یک آزمایش در روز های اول مدت زمان اختلاط را افزایش و بعد از ۲ الی ۳ روز مدت زمان اختلاط را کاهش دهند. انتظار می رود فاز متان زایی زود تر شروع شده و خلوص آن بالا رود.
۳. پیشنهاد می شود در آزمایش های بعدی همزدن پیوسته با دور بسیار پایین مورد آزمایش و مطالعه قرار گیرد. نصب پنل خورشیدی به منظور تامین نیروی محرک همزن نیز قابل اجرا می باشد.
۴. با توجه به تغییر خلوص گاز متان در دوران ماند و همچنین حذف مشکل خوردگی پیشنهاد می شود بر روی روش های فیلتراسیون، حذف بخار آب، گاز کربنیک و سولفید هیدروژن (H_2S) جهت بالابردن خلوص متان و ذخیره سازی آن تحقیقاتی انجام گیرد.

پوست ۱

دستورالعمل راه اندازی و بهره برداری از دستگاه هضم



۱. نحوه جابجایی و شرایط محل استقرار

استقرار این دستگاه در فضای بسته ممنوع می باشد. با توجه به حجم گاز تولید شده در هاضم بی هوازی این دستگاه می بایست در یک محیط باز و زیر شیلتر استقرار یابد. زیرا در صورت بالا رفتن

فشار مخزن شیر اطمینان عمل کرده و در صورت عدم انتقال به محیط باز خطر نشت گاز در محیط و انفجار را دارد. همچنین بوی نامطبوع در زمان تزریق خوراک و نمونه برداری در محیط بسته مطلوب نیست.

برای جابجایی دستگاه ابتدا قفل کن چرخ‌ها آزاد گردد و بعد از جابجایی و استقرار در محل مناسب قفل کن چرخ‌ها فعال گردد.

جابجایی در زمانی انجام شود که هاضم خالی می‌باشد.

۲. موارد ایمنی و بهداشت

در زمان باز کردن درب هاضم کلیه اتصالات برق جدا گردد.
در زمان نمونه‌گیری و یا باز کردن درب مخزن حتما فشار مخزن صفر باشد.
در زمان نمونه‌گیری و خوراک دهی از ماسک و دستکش استفاده شود.
هرگونه افروختن آتش در محوطه استقرار دستگاه هاضم ممنوع است.
مواد هضم شده به محل مناسب در خوراک دهی پیوسته و ناپیوسته انتقال یابد.

تنظیمات شیر اطمینان در محدوده ۲,۵ تا ۳ بار عمل می‌کند و تغییر فشار و تنظیمات آن مجاز نمی‌باشد.

۳. بررسی اتصالات و مسیرهای تزریق خوراک

قبل از تزریق خوراک کلیه اتصالات بررسی شود. از بسته بودن کلیه پیچ‌های دریچه راکتور و از بسته بودن مسیرهای خروج اطمینان حاصل شود. مسیر خروجی بالا به عنوان ونت استفاده کرده و تا تزریق کامل خوراک، آن را باز نگه دارید. تا مانع از بالا رفتن فشار مخزن و خلل در روند تزریق گردد.

۴. تزریق آب یا روغن جداره بیرونی

تزریق سیال به جداره اول یک بار بیشتر نیاز نیست و در زمان پر کردن آن از شیر تخلیه جهت پر کردن و از شیر قسمت فوقانی به عنوان شیر تخلیه هوای موجود در جداره استفاده می‌کنیم و تا زمان پر شدن کامل و خروج آب از شیر بالایی از بستن آن خودداری شود. لازم به ذکر است پس از تکمیل آب‌گیری ابتدا شیر پایین و سپس شیر بالایی بسته شود. برای تخلیه آب شیر بالا و پایین را باز کنید.



۵. تنظیمات دما

برای تنظیم دمای آب یک ترموستات بر روی المنت نصب شده است. آن را بر روی دمای مورد نظر تنظیم نمایید. و برای اینکه تنظیمات ترموستات‌ها دارای تolerانس ۲-۵ درجه است دمای قطع و وصل شدن ترموستات ثبت و در صورت نیاز روی عدد میانگین آن تنظیم شود.



1. www.ren21.net/gsr-2019, R.-. and G.S. REPORT., 2020-2019.
2. www.satba.gov.ir, زیست توده. ۲۰۲۱.
3. Lindkvist, E., M.T. Johansson, and J. Rosenqvist, *Methodology for analysing energy demand in biogas production plants—A comparative study of two biogas plants*. Energies, 2017. **10**(11): p. 1822.
4. www.iea.org/data-and-statistics, *Renewables Information 2020 | Documentation*. 2020.
5. www.irena.org, *IRENA (2017), Biogas for domestic cooking: Technology brief*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2017.
6. Bux, F. and Y. Chisti, *Algae biotechnology: products and processes*. 2016: Springer.
7. Matassa, S., et al., *Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint*. Microbial biotechnology, 2016. **9**(5): p. 568-575.
8. Isikgor, F.H. and C.R. Becer, *Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers*. Polymer Chemistry, 2015. **6**(25): p. 4497-4559.
9. Union, E., *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*. Official Journal of the European Union, 2009. **5**: p. 2009.
10. <http://www.satba.gov.ir/>, تاریخچه زیست توده در ایران. ۲۰۲۱.
11. Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF. 2020.Global Trends in Renewable Energy Investment 2020, h.w.f.-u.-c.o.F.a.M.
12. DUNG, R.S.O.O.B.P.I.C.-D.O.M.F.A.C.
13. Tetteh, E., et al., *Response surface optimisation of biogas potential in co-digestion of miscanthus fuscus and cow dung*. International Journal of Technology, 2018. **9**(5): p. 944-954
14. Korhaliller, S., *The UK's biomass energy development path*. London: International Institute for Environment and Development (IIED), 2010.
15. Mihaylova, I., *Oil by Gavin Bridge and Philippe Le Billon*. Cambridge: Polity Press, 2013. 256pp.,£ 12.99, ISBN 978 0 7456 4926 9. Political Studies Review, 2015. **13**(3): p. 431-431.
16. Barbieri, L., et al., *Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks*. Waste Management, 2013. **33**(11): p. 2307-2315.

17. Rauch, R., J. Hrbek, and H. Hofbauer, *Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2014. **3**(4): p. 343-362.
18. (1) نیچران, س., تولید سوخت زیستی بیوگاز. انرژیهای تجدیدپذیر و نو. ۲. p. 41-46.
19. Abowei, M., M. Ayotamuno, and C. Eze, *Comparative evaluation of batch and continuous anaerobic digesters in biogas production from municipal solid waste using mathematical models*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2009.
20. Mustafa, M.Y., R.K. Calay, and E. Roman, *Biogas from organic waste-a case study*. Procedia Engineering, 2016. **146**: p. 310-317.
21. De Vrieze, J., *Methanosaeta vs. Methanosarcina in anaerobic digestion: the quest for enhanced biogas production*. 2014, Ghent University.
22. Burg, V., et al., *Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion*. Resources, Conservation and Recycling, 2018. **136**: p. 53-62.
23. Saberlin, S., et al., *COMPRESSED BIOGAS FROM MAIZE WASTE*. Journal of Nature Science and Sustainable Technology, 2017. **11**(3): p. 213-230.
24. Danzì, C., et al., *Potential and location of an anaerobic digestion plant using prickly pear biomass in semi-arid Mediterranean environment*. Journal of Cleaner Production, 2020. **249**: p. 119396.
25. Abdo, Z.T. and I. Khatib, *Potential of biogas production from biomass and organic waste materials in the West Bank of Palestine*. 2018, LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany.
26. Leksell, N., *Present and future digestion capacity of Käppala wastewater treatment plant: a study in laboratory scale*. 2005, Sveriges lantbruksuniv.
27. Kangle, K., et al., *Recent trends in anaerobic codigestion: a review*. Universal Journal of Environmental Research and Technology, 2012. **2**(4): p. 210-219.
28. Noori, M.T., et al., *Recent advances in cathode materials and configurations for upgrading methane in bioelectrochemical systems integrated with anaerobic digestion*. Chemical Engineering Journal, 2020. **392**: p. 123689.
29. Sreekrishnan, T., S. Kohli, and V. Rana, *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review*. Bioresource technology, 2004. **95**(1): p. 1-10.
30. Parawira, W., *Anaerobic Treatment of Agricultural Residues and Wastewater-Application of High-Rate Reactors*. 2004: Lund University.
31. Boe, K., *Online monitoring and control of the biogas process*. Technical University of Denmark, 2006: p. 25-28.
32. Gerardi, M.H., *The microbiology of anaerobic digesters*. 2003: John Wiley & Sons.
33. Oibileke, K., et al., *Anaerobic digestion: Technology for biogas production as a source of renewable energy—A review*. Energy & Environment, 2020: p. 0958305X20923117.

34. Chasnyk, O., G. Sołowski, and O. Shkarupa, *Historical, technical and economic aspects of biogas development: Case of Poland and Ukraine*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **52**: p. 227-239.
35. Batstone, D.J., et al., *The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1)*. Water Science and technology, 2002. **45**(10): p. 65-73.
36. Mata-Alvarez, J., *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. 2002: IWA publishing.
37. Sterling Jr, M., et al., *Effects of ammonia nitrogen on H₂ and CH₄ production during anaerobic digestion of dairy cattle manure*. Bioresource technology, 2001. **77**(1): p. 9-18.
37. Gerlach, F., B. Grieb, and U. Zerger, *Sustainable biogas production: a handbook for organic farmers*. 2013: FiBL Projekte.
38. Wiese J and Oeynhausen B. Laboratory analysis and process analysis: biogas plant monitoring. Germany: LANGE United for Water Quality, 2009
39. Gerlach, F., B. Grieb, and U. Zerger, *Sustainable biogas production: a handbook for organic farmers*. 2013: FiBL Projekte.
40. Dhaked, R.K., P. Singh, and L. Singh, *Biomethanation under psychrophilic conditions*. Waste Management, 2010. **30**(12): p. 2490-2496.
41. Hegde, S. and T.A. Trabold, *Anaerobic digestion of food waste with unconventional co-substrates for stable biogas production at high organic loading rates*. Sustainability, 2019. **11**(14): p. 3875.
42. García-Ruiz, M.J., et al., *Biogas production and microbial community structure in a stable-stage of a two-stage anaerobic digester*. AIChE Journal, 2020. **66**(2): p. e16807.
43. Tao, Y., et al., *Biogas productivity of anaerobic digestion process is governed by a core bacterial microbiota*. Chemical Engineering Journal, 2020. **380**: p. 122425.
44. Tsapekos, P., et al. *Single cell protein production using biogas and effluent produced from anaerobic digestion of urban bio-waste*. in *16th Anaerobic Digestion World Congress*. 2019.
45. Zaher, U., et al., *Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste*. Department of Biological Systems Engineering, Washington State University, 2007.
46. Razavi, A., et al., *Bioenergy production data from anaerobic digestion of thermally hydrolyzed organic fraction of municipal solid waste*. Data in brief, 2019. **22**: p. 1018-1026.
47. Liaw, S.-S., et al., *Anaerobic digestion of C₁–C₄ light oxygenated organic compounds derived from the torrefaction of lignocellulosic materials*. Fuel Processing Technology, 2015. **131**: p. 150-158.
48. Schuler, A., D. Jenkins, and P. Ronen, *Microbial storage products, biomass density, and settling properties of enhanced biological phosphorus removal activated sludge*. Water science and technology, 2001. **43**(1): p. 173-180.

49. 1. Daigneault, A., et al., *Maine Forestry and Agriculture Natural Climate Solutions Mitigation Potential*. 2020.
50. Angelidaki, I., L. Ellegaard, and B.K. Ahring, *A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas*. Biotechnology and bioengineering, 1999. **63**(3): p. 363-372.
51. Nelson, C. and J. Lamb, *Haubenschild Farms Anaerobic Digester Updated! Final Report*, August, 2002.
52. Martin, D.J., *Accelerated biogas production without leachate recycle*. Renewable energy, 2001. **24**(3-4): p. 535-538.
53. Torquati, B., et al., *Environmental sustainability and economic benefits of dairy farm biogas energy production: A case study in Umbria*. Sustainability, 2014. **6**(10): p. 6696-6713.
54. Aguirre-Villegas, H.A. and R.A. Larson, *Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools*. Journal of cleaner production, 2017. **143**: p. 169-179.
55. Pardo, G., R. Moral, and A. del Prado, *SIMSWASTE-AD-A modelling framework for the environmental assessment of agricultural waste management strategies: Anaerobic digestion*. Science of The Total Environment, 2017. **574**: p. 806-817.
56. Khan, M.T., et al., *Batch anaerobic digestion of banana waste-energy potential and modelling of methane production kinetics*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2016. **18**(1): p. 110-128.
57. IEA, I., UNSD, WB, WHO (2019), *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2019*, Washington DC, 2019.
58. Veluchamy, C., B.H. Gilroyed, and A.S. Kalamdhad, *Process performance and biogas production optimizing of mesophilic plug flow anaerobic digestion of corn silage*. Fuel, 2019. **253**: p. 1097-1103.
59. Donoso-Bravo, A., et al., *Modelling of an anaerobic plug-flow reactor. Process analysis and evaluation approaches with non-ideal mixing considerations*. Bioresource technology, 2018. **260**: p. 95-104.
60. Al Seadi, T., *Biogas handbook*. 2008.
61. Sallis, P. and S. Uyanik, *Granule development in a split-feed anaerobic baffled reactor*. Bioresource Technology, 2003. **89**(3): p. 255-265.
62. Boopathy, R., *Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors*. Bioresource Technology, 1998. **64**(1): p. 1-6.
63. Zakkour, P., et al., *Anaerobic treatment of domestic wastewater in temperate climates: treatment plant modelling with economic considerations*. Water Research, 2001. **35**(17): p. 4137-4149.

64. Caposciutti, G., et al., *Biogas from Anaerobic Digestion: Power Generation or Biomethane Production?* Energies, 2020. **13**(3): p. 743.
65. Alvarez, R. and G. Liden, *Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste*. Renewable energy, 2008. **33**(4): p. 726-734.
66. Bayr, S., et al., *Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes*. Bioresource technology, 2012. **104**: p. 28-36.
67. Chae, K., et al., *The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure*. Bioresource technology, 2008. **99**(1): p. 1-6.
68. Buxton, D.R., *Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors*. Animal feed science and technology, 1996. **59**(1-3): p. 37-49.
69. Lamb, J.J., et al., *Perspectives of optical colourimetric sensors for anaerobic digestion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **111**: p. 87-96.
70. Davidsson, Å., *Increase of Biogas Production at Wastewater Treatment Plants Addition of urban organic waste and pre-treatment of sludge*. 2007: Lund University.
71. Liu, J., *Instrumentation, control and automation in anaerobic digestion*. 2003: Lund University.
72. Orhorhoro, E.K., O.W. Orhorhoro, and E.V. Atumah, *Performance Evaluation of Design AD System Biogas Purification Filter*. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, 2018. **3**(1): p. 17-27.
73. Marchaim, U., *Biogas processes for sustainable development*. 1992: Food & Agriculture Org.
74. Misra, U., et al., *A new temperature controlled digester for anaerobic digestion for biogas production*. Energy conversion and management, 1992. **33**(11): p. 983-986.
75. Anand, R. and R. Singh, *A simple technique, charcoal coating around the digester, improves biogas production in winter*. Bioresource technology, 1993. **45**(2): p. 151-152.
76. Tian, G., et al., *The effect of temperature on the microbial communities of peak biogas production in batch biogas reactors*. Renewable Energy, 2018. **123**: p. 15-25.
77. Ramaraj, R. and Y. Unpaprom, *Effect of temperature on the performance of biogas production from Duckweed*. Chemistry research journal, 2016. **1**(1): p. 58-66.
78. Spinosa, L. and P.A. Vesilind, *Sludge into biosolids*. 2001: IWA publishing.
79. Seruga, P., M. Krzywonos, and M. Wilk, *Thermophilic Co-Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes—The Influence of Food Industry Wastes Addition on Biogas Production in Full-Scale Operation*. Molecules, 2018. **23**(12): p. 3146.
80. Ogwang, J.O., et al., *THE DEVELOPMENT OF AN OPTIMISED SMALL SCALE ANAEROBIC DIGESTER DESIGN FOR RURAL SOUTH AFRICAN AREAS 2020*.

81. Jayaraj, S., B. Deepanraj, and V. Sivasubramanian. *Study on the effect of pH on biogas production from food waste by anaerobic digestion*. in *Proceedings of the 9th Annual Green Energy Conference, Tianjin, China*. 2014.
82. Wojcieszak, M., et al., *Adaptation of methanogenic inocula to anaerobic digestion of maize silage*. *Frontiers in microbiology*, 2017. **8**: p. 1881.
83. Attar, Y., S. Mhetre, and M. Dhawale. *Biogas production enhancement by cellulolytic strains of Actinomycetes*. in *Biogas Forum*. 1998.
84. Wahyudi, A., L. Hendraningsih, and A. Malik, *Potency of fibrolytic bacteria isolated from Indonesian sheep's colon as inoculum for biogas and methane production*. *African Journal of Biotechnology*, 2010. **9**(20).
85. Taghinazhad, J., R. Abdi, and M. Adl, *Modeling of Biogas Production Process from Cow Manure with Completely Stirred Tank Reactor under Semi Continuously Feeding*. *Journal of Agricultural Machinery*, 2018. **8**(1): p. 159-169.
86. Parawira, W., et al., *Energy production from agricultural residues: high methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion*. *Biomass and bioenergy*, 2008. **32**(1): p. 44-50.
87. Plochl, M., et al., *Hydrolytic enzymes improve fluidity of biogas feedstock*. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, 2009.
88. Pathak, B., A.K. Jain, and D. Dev, *Biogasification of cattle dung and cattle dung—rice straw mixture at different solid concentrations*. *Agricultural wastes*, 1985. **13**(4): p. 251-259.
89. اثرات زیست محیطی و مزایای اقتصادی چرخه مدیریت کود دامی با تولید بیوگاز در مزارع, سفیدپری, پ, et al., مهندسی بیوسیستم ایران (علوم کشاورزی ایران), ۱۳۹۷. ۴۹ (2 #f001012): p. -.
90. Suryawanshi, P., A. Chaudhari, and R. Kothari, *Thermophilic anaerobic digestion: the best option for waste treatment*. *Critical reviews in biotechnology*, 2010. **30**(1): p. 31-40.
91. Udelhoven, T., et al., *Retrieving the bioenergy potential from maize crops using hyperspectral remote sensing*. *Remote Sensing*, 2013. **5**(1): p. 254-273.
92. Tarbaghia, T.M., *Design of biogas plant to product energy with special application to Benghazi, Libya*. *Renewable energy*, 1993. **3**(2-3): p. 207-209.
93. Iyagba, E.T., I.A. Mangibo, and Y.S. Mohammad, *The study of cow dung as co-substrate with rice husk in biogas production*. *Scientific Research and Essays*, 2009. **4**(9): p. 861-866.
94. Kaparaju, P., et al., *Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies*. *Bioresource technology*, 2008. **99**(11): p. 4919-4928.
95. McFarland, M.J. and W.J. Jewell, *In situ control of sulfide emissions during the thermophilic (55 C) anaerobic digestion process*. *Water Research*, 1989. **23**(12): p. 1571-1577.
96. Lindmark, J., et al., *Effects of mixing on the result of anaerobic digestion*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. **40**: p. 1030-1047.

97. Li, L., et al., *Study of the performance of biogas production by mixed fermentation of cow dung, deer manure, and mushroom fungus*. Energy Science & Engineering, 2020. **8**(2): p. 466-475.
98. Stroot, P.G., et al., *Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. Digester performance*. Water research, 2001. **35**(7): p. 1804-1816.
99. Vavilin, V., et al., *Anaerobic digestion of solid material: Multidimensional modeling of continuous-flow reactor with non-uniform influent concentration distributions*. Biotechnology and bioengineering, 2007. **97**(2): p. 354-366.
100. مدلسازی زمانی و تحلیل روند تولید بیوگاز با استفاده از زمین آمار. تحقیقات سامانه‌ها و زارعی, et al., (تحقیقات مهندسی کشاورزی سابق). **۱۸**(69): p. 59-70.
101. Soeprijanto, S., et al., *The Utilization of Water Hyacinth for Biogas Production in a Plug Flow Anaerobic Digester*. International Journal of Renewable Energy Development, 2021. **10**(1): p. 27-35
102. Buekens, A. *Energy recovery from residual waste by means of anaerobic digestion technologies*. in Conference "The future of residual waste management in Europe". 2005.
103. Juanga, J.P., *Optimizing dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*. Asian Institute of Technology, 2005.
104. Jash, T. and D. Ghosh, *Studies on the solubilization kinetics of solid organic residues during anaerobic biomethanation*. Energy, 1996. **21**(7): p. 725-730.
105. Puyuelo, B., et al., *Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions*. Chemosphere, 2011. **85**(4): p. 653-659.
106. Parawira, W., et al., *Energy production from agricultural residues: high methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion*. Biomass and bioenergy, 2008. **32**(1): p. 44-50
107. Anand, V., H. Chanakya, and M. Rajan, *Solid phase fermentation of leaf biomass to biogas*. Resources, conservation and recycling, 1991. **6**(1): p. 23-33.
108. Schnurer, A. and A. Jarvis, *Microbiological handbook for biogas plants*. Swedish Waste Management U, 2010. **2009**: p. 1-74.
109. Mitchell, M., et al., *Effects of different sewage sludges on some chemical and biological characteristics of soil*. Journal of Environmental Quality, 1978. **7**(4): p. 551-559.
110. Bergamo, U., et al., *Analysis of anaerobic digester mixing: comparison of long shafted paddle mixing vs gas mixing*. Water Science and Technology, 2020. **81**(7): p. 1406-1419.
111. Serna-Maza, A., S. Heaven, and C.J. Banks, *Ammonia removal in food waste anaerobic digestion using a side-stream stripping process*. Bioresource technology, 2014. **152**: p. 307-315.
112. Serna-Maza, A., S. Heaven, and C.J. Banks, *In situ biogas stripping of ammonia from a digester using a gas mixing system*. Environmental technology, 2017. **38**(24): p. 3216-3224.

113. Cho, S.-K., et al., *Enhanced anaerobic digestion of livestock waste by ultrasonication: a tool for ammonia removal and solubilization*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2014. **31**(4): p. 619-623.
114. Lin, L., et al., *Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation*. Journal of hazardous materials, 2009. **161**(2-3): p. 1063-1068.
115. Krakat, N., et al., *Methods of ammonia removal in anaerobic digestion: a review*. Water Science and Technology, 2017. **76**(8): p. 1925-1938.
116. Ariunbaatar, J., et al., *Enhanced anaerobic digestion of food waste by supplementing trace elements: role of selenium (VI) and iron (II)*. Frontiers in Environmental Science, 2016. **4**: p. 8.
117. Singh, B., Z. Szamosi, and Z. Siménfalvi, *Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review*. Critical reviews in biotechnology, 2020. **40**(4): p. 508-521.
118. Rasapoor, M., et al., *Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation*. Fuel, 2020. **261**: p. 116497.
119. Hijazi, O., et al., *Life cycle assessment of the use of nanomaterials in biogas production from anaerobic digestion of manure*. Renewable Energy, 2020. **148**: p. 417-424.
120. El Gnaoui, Y., et al., *Mesophilic anaerobic digestion of food waste: Effect of thermal pretreatment on improvement of anaerobic digestion process*. Energy Reports, 2020. **6**: p. 417-422.
121. Shrestha, A., M.C. van-Eerten Jansen, and B. Acharya, *Biodegradation of Bioplastic Using Anaerobic Digestion at Retention Time as per Industrial Biogas Plant and International Norms*. Sustainability, 2020. **12**(10): p. 4231.
122. افسانه, ا., et al., *انرژی زیست تولید منظور به رضوی خراسان استان در توده زیست منابع پتانسیل ارزیابی*.
123. کشور های دما داری از آمار گیری طرح نتایج-، ا.ا.م. www.amar.org.ir, 1396.
124. Enhancement of food waste thermophilic anaerobic digestion through synergistic effect with chicken manure 2020 Wachiranon Chuenchart, M.L., Chirawit Leelayouthayotin, Chettiyappan Visvanathan.
125. Tun, M.M. and D. Juchelková, *Biomass sources and energy potential for energy sector in Myanmar: An outlook*. Resources, 2019. **8**(2): p. 102.
126. زیست منابع از انرژی و بیوگاز تولید پتانسیل بررسی، کوتنایی گلبابی، ف. and، عبدلی، ع.م.، و، تفتی نژاد فلاح (شماره نامه ویژه) **18**, 2016, زیست محیط تکنولوژی و علوم فصلنامه پایدار توسعه رویکرد با ایران روستاهای در توده 2)): p. 387-394
127. Pietranski, J.F., *Mechanical agitator power requirements for liquid batches*. PDH Center, 2012. **5272**.
128. کاربرد شیمی در محیط زیست زمستان ۱۳۸۹. بیوگاز تولید در ریاضی های فرمول کاربرد ایمان د. و. ا. احمد 50 تا صفحه 39 از صفحه 5 ; شماره 2 دوره ,
129. زیست محیط و انسان. هواری بی های هاضم در بیوگاز تولید مختلف ابعاد ارزیابی، et al., طاهری (1): **18**, 2020. p. 1-20.

130. علوم فصلنامه بایوپروستته بیوراکتور یک در دامی پسماندهای از متان گاز تولید فرآیند سازی شبیه، جانانه and بیکی زیست محیط تکنولوژی و، 2019. **21**(8): p. 147-158.
131. Lindmark, J., P. Eriksson, and E. Thorin, *The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste*. Waste management, 2014. **34**(8): p. 1391-1397.
132. Principles of Fluid Mixing - Crane Engineering Pages 1 - 20
133. شابک ۹۷۸۶۰۰۷۴۴۵۶۴۸ p. همزن، ا.ط.، مهندسی شیمی و نفت. (نویسنده علیرضا سلیمی-خلیل زارع)
134. Wojcieszak, M., et al., *Adaptation of methanogenic inocula to anaerobic digestion of maize silage*. Frontiers in microbiology, 2017. **8**: p. 1881
135. Torres, M.L. and M.d.C.E. Lloréns, *Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes*. Waste Management, 2008. **28**(11): p. 2229-2234.
136. Ma, S., et al., *Effects of ammoniation pretreatment on anaerobic digestion performance of rice straw*. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011. **27**(6): p. 294-299.
137. Xiong, W., et al., *Controlling the sustainability and shape change of the zinc anode in rechargeable aqueous Zn/LiMn₂O₄ battery*. Energy Storage Materials, 2018. **15**: p. 131-138.
138. Hidalgo, P., et al., *Evaluation of different operational strategies for biodiesel production by direct transesterification of microalgal biomass*. Energy & fuels, 2014. **28**(6): p. 3814-3820.
139. Salimi, A., S. Danesh, and S.H. Ebrahimi, *Effects of Retention Time and Substrate Type on Biogas and Alkalinity Productions from Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Wastes*. Journal of Environmental Science and Technology, 2016. **18**(3): p. 365-376.

Abstract

Abstract: Due to the growing demand for energy, it is necessary to make optimal use of renewable energy sources. Extraction of energy by anaerobic digesters from biomass as a renewable source in addition to producing methane gas is also a suitable method for the treatment of perishable organic matter, which greatly reduces the pollution load of organic waste in the household, agriculture, livestock and wastewater will be.

In this research, anaerobic digestion was designed and constructed with the ability to use different types of biomass. Due to the importance of digestion and the need for research in the laboratory, in this study, first, the types of anaerobic digestion were monitored and the cases that improve the speed and quality of biogas production were investigated. Then, laboratory anaerobic digestion was performed and its outputs were analyzed using different types of biomass. Biomass of Holstein dairy cattle manure and combined biomass of dairy manure and horse manure as well as the effects of mixing and concentration of the mentioned biomass were studied and also the effects of temperature, concentration and mixing in digestion in thermophilic environment of methane gas were investigated. The results showed that cases such as stirring in 4-hour periods for 5 minutes and combining horse manure with cow manure in a ratio of 1 to 3 due to reduced acidification time increased the percentage of methane from 58 to 62% in biogas produced. Also, the appropriate concentration of substrate in the thermophilic environment is between 10-7% of the solids and more than ten percent of the solids in anaerobic digestion in the thermophilic environment does interfere with the process and not enter the methane generation phase.

Keywords: Renewable Energy Sources, Biomass, biogas, Anaerobic Digestion, Methane Production



Shahrood University of
Technology

School of Mechanical Engineering and Mechatronics
Energy Systems Engineering - Energy Technology

Design and manufacture of anaerobic digester to produce biogas

By: MAHMOOD ABBASI

Supervisor:
Dr. SEYED MAJID HASHEMIAN
&
Dr. MAHMOOD CHAHARTAGHI

January, 2021