نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق
سال دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸

بررسی آزمایشگاهی اثر عوامل موثر بر بهبود فرایند تولید بیوگاز از پسماندهای غذایی و آنالیز انرژی آن

سید مهدی حسنی[۱]، مسعود ایرانمنش[۲*]، حسین امیری[۲] و محمود رحمتی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، hasani.mahdi888@gmail.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، m.iranmanesh@kgut.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، hosseinamiri2010@gmail.com

۳- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، m.rahmati @ kgut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۹/۲۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۱۲/۱۷، پذیرش: ۹۸/۲/۷)

چکیده: دراین پژوهش، پارامترهای موثر در تولید بیوگاز از پسماندهای غذایی به‌همراه کود دامی موجود در منطقه و افزودنی‌های ارگانیک بررسی شده است. پسماندهای غذایی از رستوران دانشگاه جمع‌آوری و با کود دامی (گاوی) با نسبت‌های مختلف ۱:۱، ۱:۲، ۱:۳ و ۳:۱ در مقیاس آزمایشگاهی در محدوده دمایی ترموفیلی (۵۵-۶۰ درجه سانتی‌گراد) به‌مدت ۱۵روز قرار داده و حجم گاز تولیدی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از تولید گاز برای نسبت‌های مختلف کود دامی و پسماند غذایی نشان داد که بیشترین حجم گاز تولیدی مربوط به نسبت ۱:۱ با میزان گاز تجمعی ۵ لیتر است. با افزودن ۱۰ گرم افزودنی شیمیایی سیلیکاژل و گیاه رزماری، پوست گردو، پوست موز و گوجه به مخلوط فوق به‌ترتیب میزان گاز تجمعی ۲۴/۴، ۲/۷، ۲/۳، ۱/۹ و ۰/۶ درصد حجمی افزایش را نشان داد. در طول دوره هضم، تغییرات pH نشان داد که بالاترین میزان حجم گاز در pH خنثی تولید شد. استفاده از پوست گردو باعث تثبیت pH در فرایند شد. همچنین، با اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی (مواد جامد، مواد فرار، رطوبت و درصد خاکستر) مخلوط پسماند غذایی با کود دامی ظرفیت تولید بیوگاز ۰/۴۳ درصد برآورد شد که نشان‌دهنده ظرفیت بالای پسماند غذایی برای تولید بیوگاز است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از راکتور پرتابل آزمایشگاهی بر روی مخلوط بهینه پسماندهای غذایی وکود دامی آنالیز انرژی در آن بررسی شد.

کلیدواژگان: پسماند غذایی، بیوگاز، افزودنی‌های ارگانیک، آنالیز انرژی

مقدمه

امروزه، با افزایش جمعیت و توسعه جوامع بشری، مشکلات ناشی‌از آلودگی‌های سوخت‌های فسیلی و محدودیت منابع انرژی، استفاده از منابع انرژی جایگزین ازجمله زیست‌توده را اجتناب‌ناپذیر کرده است. ازطرفی توسعه پایدار انرژی زیست‌توده می‌تواند با سطح جنگل‌زدایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای بحران زیست‌محیطی را افزایش دهد. با توجه به افزایش تولید زباله‌های خانگی و فاضلاب‌های صنعتی و دردسترس‌بودن کود دامی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع آن‌ها می‌توان منابع فوق را به‌عنوان منبع بالقوه برای تولید بیوگاز و منبع انرژی جایگزین برای گاز طبیعی برای مصرف خانواده‌ها به‌عنوان منبع پایدار استفاده کرد. ترکیب مناسب منابع فوق با یکدیگر تاثیر بسزایی درتامین بهینه انرژی خواهد داشت[۱]. زیست‌توده، به‌علت محتوای مواد آلی بالا، مناسب‌ترین منبع اولیه بیوگاز است. یکی از این زیست‌توده‌ها، که به‌وفور در کشور یافت می‌شود، پسماندهای غذایی است.

براساس آمار گزارش سازمان جهانی غذا و خواربار (FAO)[1]، ایران رتبه اول سرانه تولید ضایعات و پسماندهای غذایی در جهان را به خود اختصاص داده و جزو سه کشوری است که بیشترین ضایعات پسماند غذایی را در جهان دارند. آمارها نشان می‌دهد حدود ۳۰ درصد مواد غذایی در ایران ضایع می‌شود[۲]. آمارهای فائو رقم تکان‌دهنده‌ای از ضایعات پسماندهای غذایی در ایران را گزارش می‌دهد. بر این اساس هر سال ۱/۲ میلیارد تن پسماند غذایی در جهان تولید می‌شود که بیشترین ضایعات مربوطبه میوه و سبزیجات، ماهی و غلات است. این در حالی است که ایران ۲/۱ درصد از ضایعات پسماندهای غذایی جهان را به‌خود اختصاص می‌دهد که این رقم معادل ۳۵ میلیون تن در سال است. بیشترین ضایعات پسماندهای غذایی در ایران مربوطبه نان، میوه، سبزیجات و برنج است. با توجه به آمارهای ارائه‌شده در زمینه تولید پسماندهای غذایی در ایران، ترکیب آن‌ها شامل ۳۰ درصد ضایعات نان،۵۰ درصد ضایعات میوه و سبزیجات،۱۰درصد ضایعات برنج، ۲۵ درصد ضایعات خرما و غیره اشاره کرد[۲].

ارزیابی پتانسیل بیوگاز از پنج زباله خام فرآوری‌شده شامل بقایای سویا، پاپایا، نان برنج، نخودفرنگی و نیشکر، با استفاده از هر دو فرایند هضم ناپیوسته و هضم مداوم، در پنج زمان نگهداری مختلف توسط نیرامول جانتاراچات[۳] انجام شد. نتایج بررسی‌های انجام‌شده تحت دمای مزوفیلیک (۳۴-۳۷ درجه سانتی‌گراد) و در زمان‌های نگهداری ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ روز نشان داد که بیشترین مقدار حجم بیوگاز تولیدی مربوطبه سویا بوده و نتایج دستگاه کروماتوگرافی بیشترین درصد متان را مربوطبه سویا نشان داد. با این حال، برای افزایش گاز تولیدی و دست‌یابی به گاز با ارزش حرارتی بالا، می‌توان از ترکیب مواد لیگنوسلولوزی استفاده کرد. پاک چون چان و همکاران[۴] تاثیر افزودن مکمل‌های شیمیایی به پسماندهای غذایی و فاضلاب خانگی در غلظت‌های مختلف را بررسی کرده و نشان دادند با افزودن مکمل‌های فوق میزان تبدیل مواد ارگانیک به بیومتان به حداکثر رسیده و موجب افزایش بیوگاز تولیدی خواهد شد.

اوانگ سانکینا و همکاران[۵] از ضایعات و فضولات دامی برای تولد بیوگاز استفاده کردند و نشان دادند با اضافه‌کردن آب پنیر به فضولات دامی سرعت فرایند تخمیر تولید بیوگاز افزایش پیدا خواهد کرد. مالگورزاتا لوچنسکا و همکاران[۶] برای به‌دست‌آوردن بیوگاز از فضولات حاصل از پرورش کرم ابریشم و ضایعات کشاورزی حاصل از تغذیه پرورش این نوع کرم استفاده کردند و میزان بیوگاز به‌دست‌آمده را با دیگر منابع تولید بیوگاز در کشور لهستان در سال ۲۰۱۸ مقایسه کردند.

نسیم خیام و همکاران[۷] به‌دست‌آوردن بیوگاز در مقیاس آزمایشگاهی را در چندین راکتور بی‌هوازی با استفاده از ضایعات کشاورزی چای به‌همراه کود دامی و با اندازه‌گیری پارامترهای کربن، ازت و میزان اسیدی‌شدن مخلوط فوق بررسی کردند و میزان گاز متان به‌دست‌آمده از ترکیب فوق را ۷۰ درصد و با ارزش حرارتی ۴/۲۶ mj/kg گزارش دادند.

محمد ارشد و همکاران[۸] تولید برق از انرژی بیوگاز را با استفاده از فضولات و ضایعات پرورش طیور بررسی کردند و امکان‌سنجی تولید ۲۸۰ MWh/day برق از فضولات طیور را در کشور پاکستان در سال ۲۰۱۷ تخمین زدند. فرخ‌علی لطیفی و همکاران[۹] از ضایعات میوه خرما برای تولید بیوگاز در راکتورهای بی‌هوازی استفاده کردند و دمای بهینه انجام فرایند و نسبت بهینه میزان اختلاط مواد مخلوط مورد استفاده را در راکتورهای بی‌هوازی اندازه‌گیری و مشخص کردند.

مارجکاکی و همکاران[۱۰] برای تولید بیوگاز از لجن فاضلاب در راکتورهای بی‌هوازی استفاده کردند و برای بهبود فرایند تولید بیوگاز لجن فاضلاب را با آب پنیر و ضایعات زیتون مخلوط کرده و نهایتا با بررسی پارامترهای عملیاتی در راکتور بیوگاز موفق به افزایش حجم بیوگاز تولیدی در سال ۲۰۱۷ شدند.

اسپیریدان آچیناز و همکاران[۱] به بررسی فنی و اقتصادی انرژی بیوگاز از مواد زائد و پسماندهای غذایی و محصولات کشاورزی پرداختند و فرصت‌های سرمایه‌گذاری برای جایگزینی مقرون‌به‌صرفه انرژی بیوگاز در مقیاس‌های کوچک و بزرگ در نقاط مختلف جهان را ارزیابی کردند. سیلیکاژل به‌عنوان ماده جاذب شیمیایی باعث ایجاد غلظت‌های موضعی بالا در بستر هاضم شده و سبب بهبود فرایند هضم می‌شود. این مناطق جذب محیطی مناسب‌تر برای رشد و ازدیاد تعداد باکتری‌ها و در

1. Food and Agriculture Organization

نتیجه افزایش حجم بیوگاز خواهد شد. جی آحامد و همکاران[۱۲] برای به‌دست‌آوردن بیوگاز از ترکیب فضولات مرغی و پسماندهای غذایی استفاده کردند و برای افزایش حجم بیوگاز تولیدی از افزودنی شیمیایی سیلیکاژل به‌عنوان کاتالیزور برای ترکیب فوق استفاده کردند و نشان دادند با اضافه‌کردن سیلیکاژل به مخلوط پسماند غذایی و کود مرغی مقدار بیوگاز تولیدی افزایش پیدا خواهد کرد. زیرا، اثر کاتالیزوری و جذب ژل سیلیکا برای حذف گازهای ناخواسته مانند CO_2 مورد استفاده قرار می‌گیرد که در فرایند هضم منجربه افزایش تولید بیوگاز خواهد شد.

پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد در زمینه به‌دست‌آوردن بیوگاز از پسماندهای غذایی و همین‌طور کودهای دامی کارهای زیادی انجام شده، ولی در زمینه یافتن ترکیب بهینه آن‌ها و همچنین بررسی در خصوص افزودنی‌هایی که می‌تواند منجربه افزایش بازده تولید بیوگاز شود کار چندانی صورت نگرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر، علاوه‌بر پتانسیل‌سنجی به‌دست‌آوردن بیوگاز از پسماندهای غذایی رستوران دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان، مطالعات آزمایشگاهی برای یافتن درصد اختلاط بهینه پسماندها با کود دامی، افزودنی‌های شیمیایی و ضایعات ارگانیک کشاورزی انجام شد. این کار با توجه به نوع ترکیبات و حجم تولید روزانه پسماندها (تقریبا ۲۰ تا ۳۵ کیلوگرم) با هدف افزایش بازده تولید بیوگاز، با استفاده از راکتور آزمایشگاهی صورت گرفته است. همچنین، اثر عوامل مختلف بر تولید بیوگاز شامل زمان انجام فرایند، نوع ترکیبات و افزودنی‌ها، pH مخلوط و خواص فیزیکی آن‌ها بررسی شد.

مواد و روش‌ها

ترکیبات مورد استفاده در این آزمایش‌ها عمدتا شامل پسماندهای غذایی اعم‌از برنج، حبوبات، سبزیجات، گوشت و محصولات لبنی بود که از محل رستوران دانشگاه (تقریبا ۲۰ تا ۳۵ کیلوگرم در روز) تهیه و در فرایند هضم بی‌هوازی مورد استفاده قرار گرفته است. افزودنی‌های مورد استفاده نیز شامل کود دامی موجود در منطقه و ضایعات کشاورزی ازقبیل پوست موز، پوست گردو، برگ و ساقه رزماری، نعناع، به ژاپنی و گوجه و افزودنی‌های شیمیایی (سیلیکاژل) در فرایند تولید بیوگاز بوده است. رزماری دارای ترکیبات آروماتیک و اسانس است که حاوی مقادیر بالای آنتی‌اکسیدان‌هایی نظیر اسیدرزمارینیک، اسیدکافئیک، اسیدبوتولیک، کارنوسول و فیبر است که موجب ترمیم و رشد بافت سلولی باکتری‌های متانوژن می‌شود. همچنین، گیاه رزماری دارای درصد بالای ترکیبات و مواد فرار است. درواقع، مواد فرار ترکیباتی‌اند که در اثر واکنش‌های شیمیایی آزادشده و به بیوگاز تبدیل می‌شوند. در فرایند تولید بیوگاز هرچه میزان مواد فرار مواد تشکیل‌دهنده گیاه بیشتر باشد، در اثر فرایند هضم، حجم گاز نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

آزمایش‌ها در مرحله اول برای تعیین نسبت ترکیب بهینه مخلوط پسماند غذایی و کود دامی به‌منظور غنی‌سازی محلول از باکتری‌های متان‌ساز با ترکیب نسبت‌های مختلف انجام شد. به‌منظور آماده‌سازی مخلوط، ابتدا، پسماندهای غذایی از رستوران دانشگاه تحصیلات تکمیلی جمع‌آوری و پس از وزن‌کردن به مقدار مشخص با استفاده از دستگاه آسیاب به ذره‌های ریز تبدیل شدند. کود گاوی مورد استفاده از یک گاوداری در نزدیکی دانشگاه تهیه و پس از وزن‌کردن به مقدار مشخص با آب و پسماندهای غذایی مخلوط شده و درون راکتور و بطری‌های تعبیه‌شده ریخته و در دمای مورد نظر قرار داده شدند. سپس، در مرحله دوم، مجددا مواد با نسبت‌های مشخص تهیه و افزودنی‌های فوق به آن اضافه شدند.

مخلوط پسماند و کود گاوی آماده‌سازی‌شده در یک راکتور آزمایشگاهی پرتابل شیشه‌ای دوجداره به حجم کلی ۴ لیتر (۱/۵ کیلوگرم مخلوط پسماند غذایی با کود دامی + ۱/۵ کیلوگرم آب)، که مجهز به همزن برقی با دور متغیر و سیستم چرخش روغن برای تامین دمای مورد نیاز فرایند بود، مطابق شکل ۱ بارگذاری شد که نتایج حاصل از آن در قسمت نتایج ارائه شده است.

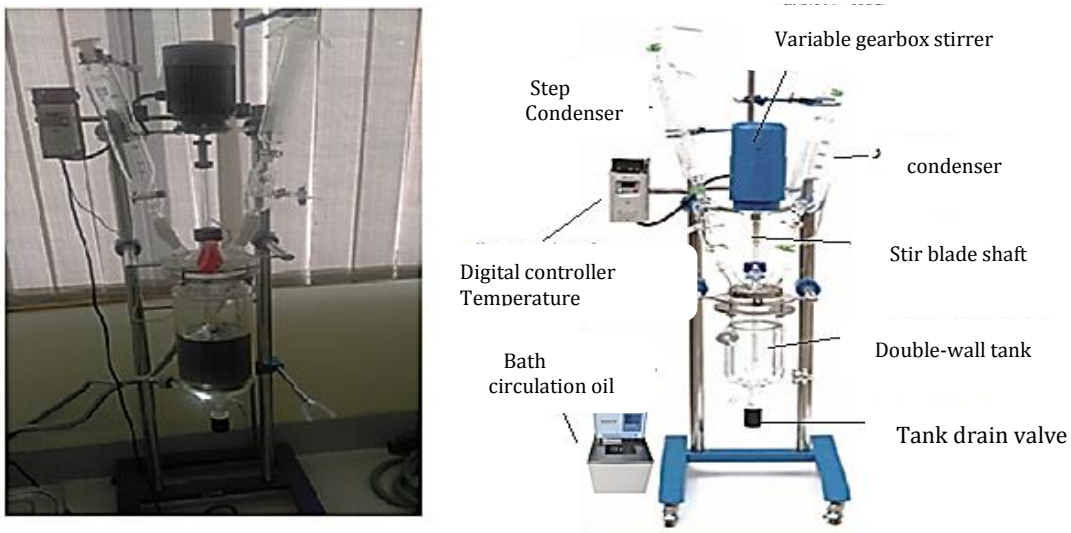

Figure 1- Loading of materials and food residues in portable laboratory biogas reactor

شکل ۱- بارگذاری مواد و پسماندهایی غذایی در راکتور بیوگاز پرتابل آزمایشگاهی

روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا، لازم است آماده‌سازی مخلوط پسماندهای غذایی و افزودنی‌ها صورت گیرد که به این منظور، پس از جداسازی استخوان‌ها وکیسه‌های پلاستیکی، پسماندهای مواد غذایی شامل برنج، گوشت، سبزی، حبوبات و خرده‌های نان درچرخ گوشت ریخته و به ذرات ریز تبدیل شدند که موجب هضم سریع‌تر توسط باکتری‌ها و یکنواخت‌شدن محیط کشت و افزایش بیوگاز تولیدی خواهد شد[۱](شکل ۲).

سپس، برای تولید بیوگاز به روش هضم بی‌هوازی، پسماندهای غذایی آسیاب‌شده با کود دامی و آب با نسبت مشخص مخلوط شد و برای دست‌یابی به نسبت بهینه ترکیب آن‌ها، پنج نمونه مخلوط کود دامی و پسماند غذایی با نسبت ترکیب‌های متفاوت ۱:۱، ۱:۳ و ۳:۱ و کود دامی خالص و پسماند غذایی خالص، مطابق مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱، آماده شد و در بطری‌هایی به حجم یک لیتر ریخته شد. سپس، کلیه بطری‌ها در حمام آب گرم مجهز به ترموستات تنظیم دما، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، به‌مدت زمان ۱۵ روز، قرار داده شد و حجم گاز تولیدی به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

Figure 2- Grinding food waste

شکل ۲- آسیاب‌کردن و آماده‌سازی پسماند غذایی

Figure 3- Placing samples prepared in a hot water bath

شکل ۳- قرارگیری نمونه‌های آماده‌شده در حمام آب گرم

اندازه‌گیری خواص فیزیکی-شیمیایی مواد

در این قسمت، به بررسی و روش اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی–شیمیایی مواد شامل pH، کل مواد جامد، مواد فرار، رطوبت، محتویات خاکستر و حجم گاز تولیدشده پرداخته می‌شود. ابتدا، برای اندازه‌گیری حجم بیوگاز تولیدی روزانه از روش حجم جابه‌جایی آب مطابق شکل ۴ استفاده شد[۱]. بدین‌منظور، مواد مخلوط مورد نظر در بطری‌های ۱/۵ لیتری ریخته شده و پس از عبور شیلنگ خروج گاز درب بطری آب‌بندی شد و میزان آب خروجی حاصل از تولید گاز از بطری در استوانه مدرج ریخته و مقدار آن به صورت روزانه اندازه‌گیری و ثبت شد.

آزمایش‌ها در مرحله اول برای تعیین نسبت ترکیب بهینه مخلوط پسماند غذایی و کود دامی، مطابق جدول ۱، با نسبت ترکیب‌های متفاوت انجام و میزان حجم بیوگاز تولیدی روزانه اندازه‌گیری شد و همان‌طورکه در قسمت نتایج در نمودار شکل ۱۰ قابل مشاهده است، نسبت ترکیب ۱:۱ پسماند غذایی با کود دامی بیشترین حجم تولیدی گاز را نشان می‌دهد. بنابراین، ترکیب ۱:۱ پسماند غذایی با کود دامی با بیشترین حجم تولید گاز به‌عنوان نسبت ترکیب بهینه شناخته شد و در مرحله دوم افزودنی‌های سیلیکاژل، گیاه رزماری، نعناع، پوست موز، به ژاپنی، گوجه و پوست گردو به مقدار هرکدام ۱۰ گرم به ترکیب فوق اضافه شد که در جدول ۲ قابل مشاهده است. سپس، مجدداً، میزان بیوگاز تولیدی به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد.

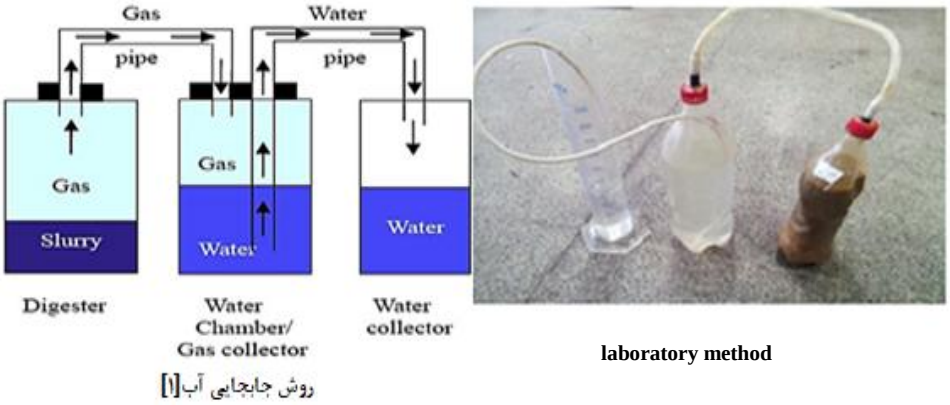

Figure 4- daily measurements of the volume of biogas produced by the water displacement method

شکل ۴- اندازه‌گیری روزانه حجم بیوگاز تولیدی به روش جابجایی حجم آب

جدول ۱- مواد و ترکیبات مورد استفاده تولید بیوگاز در حجم ۱ لیتر

Table 1- The materials and compounds used in the production of biogas in a volume of 1 liter

Type of compound ingredients	Combination of ingredients (g)
cow manure + water	250+250
food waste + water	250+250
Food waste + cow manure + water	125+375+500
Food waste + cow manure + water	375+125+500

جدول ۲- ترکیب افزودنی‌ها با مخلوط کود دامی و پسماند غذایی

Table 2 - Additive mixing with manure and food waste

Type of additives (g)	Amount of additives (g)	Combination of ingredients (g)	Type of material
Silica gel	10	250+250+500	Water+cow manure+Food waste
Rosemary	10	250+250+500	Water+cow manure+Food waste
Peppermint	10	250+250+500	Water+cow manure+Food waste
To Japanese	10	250+250+500	Water+cow manure+Food waste
peel of banana	10	250+250+500	Water+cow manure+Food waste
Walnut shell	10	250+250+500	Water+cow manure+Food waste
Tomato	10	250+250+500	Water+cow manure+Food waste

برای اندازه‌گیری روزانه PH از دستگاه pH متر استفاده شد و برای تثبیت میزان pH مورد نظر از محلول سود NaOH و محلول بازی HCl با نسبت مشخص در زمان بارگذاری مواد مورد نظر استفاده شد[۱۳] و پس از آن تغییرات pH به‌صورت روزانه اندازه‌گیری و ثبت شد که در قسمت نتایج ارائه داده خواهد شد (شکل ۵).

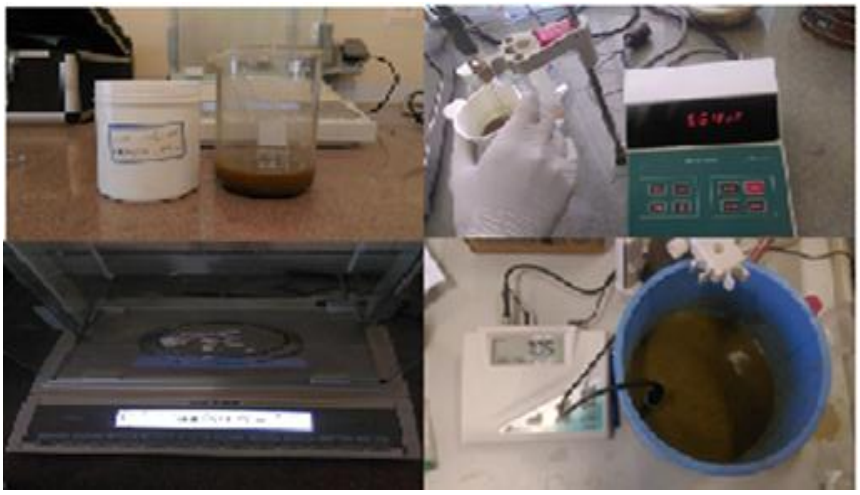

Figure 5- Measure and adjust the pH of the material
شکل ۵– اندازه‌گیری و تنظیم pH مواد

بررسی خصوصیات فیزیکی مواد (مجموعه جامدات، مواد جامد فرار، رطوبت و محتویات خاکستر) با روش استاندارد برای بررسی آب و فاضلاب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت[۱۴] که نحوه اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی فوق در شکل ۶ مشاهده می‌شود و نتایج حاصل از اندازه‌گیری در قسمت نتایج در جدول ۴ ارائه داده شده است.

Figure 6- Measurement of the physical properties of the materials used in the production of biogas
شکل۶– اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی مواد مورد استفاده در تولید بیوگاز

کل مواد جامد (TS)[1] شامل مواد آلی و مواد غیرآلی در مواد خام است[۱۵]. روش اندازه‌گیری به این صورت است که به‌طور مثال ۲۰ گرم از ماده اولیه تازه را وزن کرده (W_2) و در یک ظرف خالی (W_1) ریخته و در یک کوره در دمای ۱۰۵ درجه

1. Total solids

سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت قرار داده و وزن خشک‌شده آن (W_3) به‌دست می‌آید. سپس، مقدار کل مواد جامد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\%TS = \frac{W3-W1}{W2} \times 100 \quad (۱)$$

جامدات فرار (VS)[1] نماینده مواد آلی مواد اولیه‌اند (به‌جز نمک‌های معدنی و خاکستر)[۱۴] که برای اندازه‌گیری، به‌طور مثال، ۳ گرم از ماده خشک‌شده درکوره را وزن کرده (B) و در یک ظرف خالی (A) به‌مدت ۱ ساعت در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و آنگاه خاکستر باقی‌مانده (C) را وزن می‌کنیم. سپس، از معادله زیر مقدار مواد جامد فرار محاسبه می‌شود[۱۵]:

$$\%VS = \frac{C-A}{B} \times 100 \quad (۲)$$

شاخص بهره‌وری

عملکرد کارایی راکتور و تبدیل مواد خام به بیوگاز با محاسبه پارامتر زیر تخمین زده می‌شود:

$\frac{TS}{VS}$ Lost: نسبت مواد جامد به مواد فرار تلف‌شده در فرایند هضم بی‌هوازی

برای اندازه‌گیری شاخص بهره‌وری، ابتدا، مقدار TS/VS مواد اولیه مورد استفاده را قبل از هضم بی‌هوازی در راکتور اندازه‌گیری کرده و سپس، مجددا، مقدار آن پس از هضم نهایی اندازه‌گیری می‌شود. تفاضل میان مقدار اولیه با مقدار نهایی پس از فرایند هضم به‌عنوان شاخص بهره‌وری تعیین می‌شود که از رابطه (۳) به‌دست می‌آید[۱۵]:

$$\frac{TS}{VS}\text{ Lost} = \text{initial }\frac{TS}{VS} - \text{Final }\frac{TS}{VS} \quad (۳)$$

آنالیز انرژی راکتور بیوگاز

آنالیز انرژی برمبنای قانون اول ترمودینامیک و با استفاده از معادلات موازنه انرژی، با مشخص‌کردن مرز سیستم و حجم کنترل درنظرگرفته‌شده برای راکتور بیوگاز پرتابل آزمایشگاهی، مطابق شکل ۷، قابل محاسبه است. ابتدا، مقدار انرژی‌های ورودی و خروجی راکتور را محاسبه کرده و سپس آنالیز انرژی انجام می‌شود.

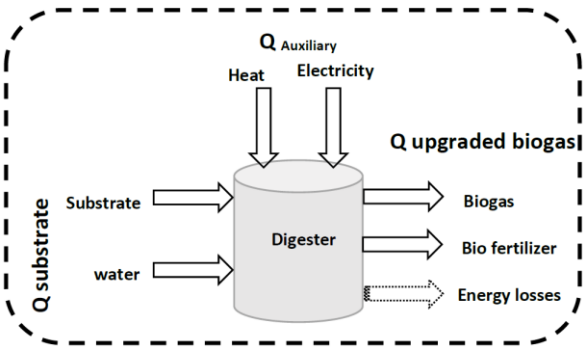

Figure 7- A schematic view of the energy balance & boundary of the system considered for the biogas reactor

شکل ۷- نمای طرحواره مرز سیستم و موازنه انرژی درنظرگرفته‌شده برای راکتور بیوگاز

معادلات و روابط حاکم بر آنالیز انرژی برمبنای قانون اول ترمودینامیک استخراج و پس از ساده‌سازی آن‌ها روابط به‌ترتیب به‌صورت زیر نوشته می‌شوند[۱۶]:

$$E_{in-}E_{out=}\Delta E \quad (۴)$$

1. Volatile solids

که در آن E_{in} انرژی ورودی، E_{out} خروجی و ΔE تغییرات انرژی‌اند.

$$W_{in}-Q_{out}= E_{in}-E_{out} = \Delta E \quad (۵)$$

که در آن W_{in} کار ورودی و Q_{out} گرمای خروجی مخلوط‌اند.

با توجه به اینکه بدنه راکتور ساخته‌شده از جنس پلی‌اتیلن سه‌لایه است، سیستم عایق درنظر گرفته شده و از اتلافات حرارتی چشم‌پوشی می‌شود. بنابراین، رابطه (۵) به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$W_{in}+E_{out} =E_{in} \quad (۶)$$

بازده انرژی راکتور (مقدار انرژی خروجی مفید) با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\eta = Qub / Qaux + Qs \quad (۷)$$

که در آن Q_{ub} مقدار انرژی گرمایی متان خروجی از سیستم، Q_{aux} انرژی گرمایی مصرفی تجهیزات جانبی، Q_s مقدار انرژی گرمایی مواد و پسماندهای غذایی‌اند[۱۷].

برای محاسبه میزان انرژی واقعی بیوگاز برای حجم‌های بالا در نیروگاه‌های تولید بیوگاز از رابطه (۸) استفاده می‌شود[۱۸]. در این رابطه، برای تخمین مقدار درصد گاز متان بیوگاز تولیدشده که نشان‌دهنده ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی است، مقداری از گاز تولیدشده با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC)[1] آنالیز و در رابطه فوق جای‌گذاری شده، سپس انرژی بیوگاز محاسبه می‌شود.

$$E_{Biogas} (KWh) = V_{biogas} (Nm^3) \times \% \text{ Methane} \times 9.81 \quad (۸)$$

در موازنه انرژی راکتور بیوگاز مقادیر انرژی‌های ورودی شامل انرژی الکتریکی مصرفی برای همزن برقی راکتور، انرژی حرارتی برای تامین حرارت راکتور توسط هیتر برقی، انرژی‌ای که از طریق تغذیه مواد ورودی به راکتور اضافه می‌شود (مانند آب مصرفی، مواد افزودنی و پسماند غذایی) و انرژی‌های خروجی (شامل کود غنی‌شده و بیوگاز تولیدی) و نهایتا اتلافات حرارتی درنظر گرفته شده که نتیجه محاسبه آن‌ها در بخش نتایج ارائه شده است. محاسبه میزان بازده انرژی راکتور براساس محاسبه میزان پتانسیل متان (MP[2]) خروجی و محتوای انرژی مواد و پسماندهای ورودی به راکتور صورت می‌گیرد[۱۷].

مقدار انرژی بیوگاز خروجی سیستم با استفاده از معادله (۹) محاسبه می‌شود که به این منظور، ابتدا، مقدار پتانسیل متان خروجی از مرجع [۲۳] تخمین زده شده، سپس، با جای‌گذاری در رابطه فوق محاسبه می‌شود:

$$Qub (KWH) = MP \times 11.06 \quad (۹)$$

که در آن MP مقدار پتانسیل متان خروجی بیوگاز حاصل از مواد و پسماندهای غذایی است و مقدار آن برای هر کیلوگرم TS (m^3/kg) ۰/۳ درنظر گرفته شده و بر این اساس مقدار انرژی بیوگاز خروجی محاسبه می‌شود.

بحث و بررسی نتایج

همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، نتایج آزمایش‌های مرحله اول نشان داد که بهترین نسبت ترکیب اختلاط کود دامی و پسماند غذایی برای تولید بیشترین حجم بیوگاز، نسبت ترکیب ۱:۱ است و در مرحله دوم با افزودن پسماندهای ارگانیک کشاورزی میزان حجم بیوگاز تولیدی اندازه‌گیری شده که نتایج حاصل مطابق جدول ۳ و نمودار شکل ۸ نوسانات و حجم بیوگاز تولیدشده را در مدت زمان ۱۵ روز می‌توان مشاهده کرد.

نتایج به‌دست‌آمده در نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌ها موجب افزایش میزان بیوگاز تولیدی خواهد شد. بیشترین مقدار اندازه‌گیری‌شده حجم گاز تولیدی مربوطبه افزودنی سیلیکاژل با ۲۴/۴ درصد افزایش است و کمترین مقدار آن مربوطبه پسماندهای غذایی خالص است.

1. Gas Chromatography
2. methane potential

جدول ۳- میزان حجم بیوگاز تولیدی (ml) بر اثر اضافه‌کردن ۱۰ گرم از مواد مختلف به مخلوط بهینه پسماند غذایی و کود دامی

Table 3- Effect of adding different materials (10 g) on the amount of produced biogas (ml) with optimum mix of food and manure

Day	CM[2]	Fw[1]	Fw/ CM 3:1	Fw/ CM 1:3	Fw/ CM 1:1	Silica gel 10(g)	Rosemary 10(g)	Peppermint 10(g)	Japanese Quince 10(g)	peel of banana 10(g)	Tomato 10(g)	Walut shell green 10(g)
1	350	45	315	195	365	550	620	320	265	285	385	425
2	395	360	525	325	590	915	1235	725	375	435	525	735
3	515	270	925	235	925	990	930	925	905	820	875	740
4	475	165	795	220	990	1250	725	550	745	915	635	1005
5	350	0	520	0	1815	1925	695	425	810	1110	980	1395
6	315	0	125	40	195	375	485	225	445	665	835	605
7	225	25	0	0	75	95	225	125	320	420	505	135
8	65	0	0	0	45	65	125	95	65	265	245	55
9	45	0	0	0	0	55	95	0	0	125	45	15
10	20	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0
11	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

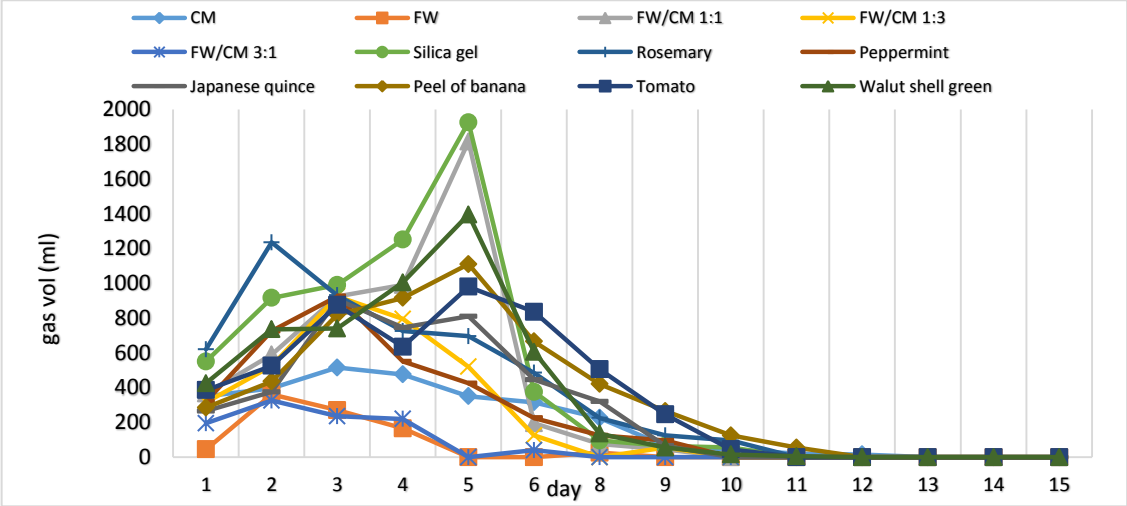

Figure 8- Chart of the daily variation in the amount of biogas produced from different combinations

شکل ۸- نمودار تغییرات روزانه میزان بیوگاز تولیدی از ترکیبات مختلف

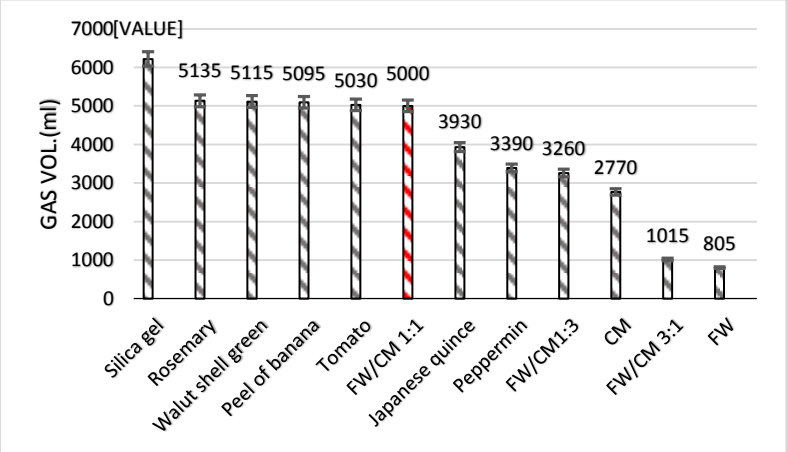

Figure 9- Generate the total amount of biogas produced by a mixture of food waste and manure with different additives in 15 days

شکل ۹- نمودار تجمعی میزان بیوگاز تولیدی مخلوط پسماند غذایی و کود دامی با افزودنی‌های مختلف در مدت ۱۵ روز

1. Food waste
2. Cow manure

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای تولید بیوگاز استفاده از پسماندهای غذایی و کود دامی به‌تنهایی در تولید بیوگاز موثر نخواهد بود و با ترکیب مناسب پسماندهای غذایی با کود دامی و اضافه‌کردن مواد افزودنی میزان گاز تولیدی به‌صورت چشمگیری افزایش خواهد یافت که در جدول ۴، درصد تغییرات حجم مقدار بیوگاز تولیدی نسبت‌به مخلوط بهینه ۱:۱ با استفاده از ترکیبات و افزودنی‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۴- درصد تغییرات حجم بیوگاز تولیدی نسبت‌به مخلوط بهینه پسماندهای غذایی با کود دامی با نسبت ۱:۱

Table 4- The percentage of produced biogas changes compared to the optimal mixture of FW/CM1: 1

Type of material	Silica gel	Rosemary	Walut shell green	peel of banana	Tomato	Japanese Quince	Peppermint	FW/CM 1:3	CM	FW/CM 3:1	FW
Percent change%	+24.4	+2.7	+2.3	+1.9	+0.6	-24.1	-32.2	-34.8	-44.6	-79.7%	-83.9

نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری روزانه میزان pH مواد مخلوط در نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد که میزان تغییرات pH ضایعات مخلوط در هر واکنش بین محدوده ۴ تا ۶ است که با محدوده مطلوب pH برای تولید بیوگاز قابل مقایسه است[۱۹].

استفاده از افزودنی پوست گردو موجب قرارگیری pH در محدوده بهینه می‌شود. همچنین، اسیدی‌ترین محدوده pH مربوط‌به پسماند غذایی خالص است که با ترکیب با کود دامی به حالت تعادل می‌رسد. مقدار pH کود دامی خالص در طول دوره هضم در محدوده بهینه قرار داشته و موجب برقراری تعادل در طول دوره هضم می‌شود.

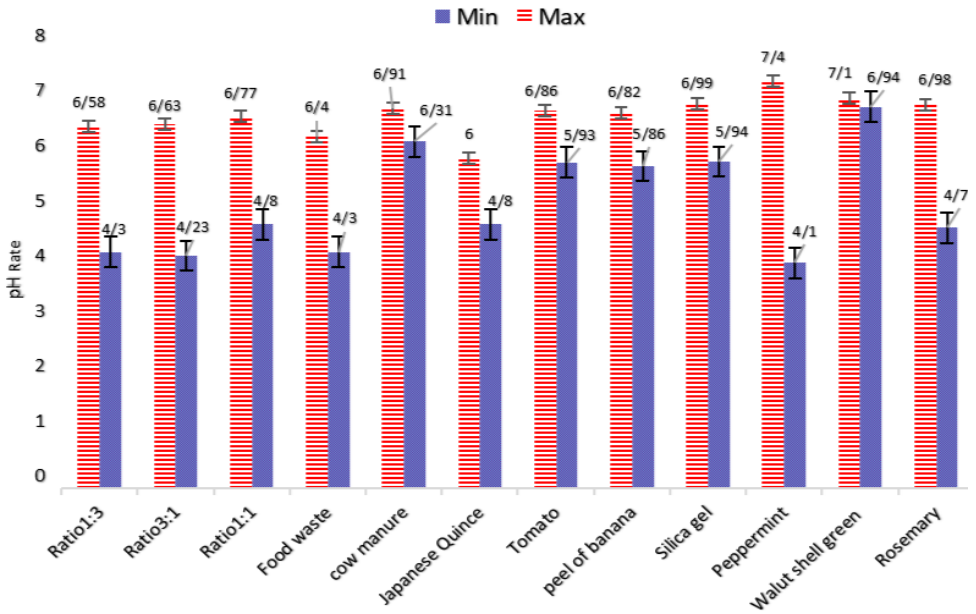

Figure 10- shows the pH variations of different compounds during fermentation

شکل ۱۰- نمودار میزان تغییرات pH از ترکیبات مختلف در طول زمان تخمیر

خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری‌شده مواد استفاده‌شده در فرایند هضم بی‌هوازی شامل کل جامدات، مواد جامد فرار، رطوبت و محتویات خاکستر، که در جدول ۵ ارائه شده، نشان می‌دهد که گوجه دارای حداکثر رطوبت ۸۶/۸۴ و نان دارای حداقل رطوبت ۴۵/۱۶ است. بالابودن رطوبت نشان‌دهنده هضم آسان‌تر توسط باکتری‌های بی‌هوازی است. حداکثر مقدار TS در نان ۵۴/۴۸ و مقدار (VS) بین ۸۳/۸۶ برای گردو و ۹۵/۶۵ برای پسماندهای غذایی متفاوت است. نتایج ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده کود دامی مورد مطالعه در این تحقیق به‌صورت زیر است:

مواد جامد (TS) ۲۰ درصد از وزن کل ماده و محتوای رطوبت آن ۸۰ درصد اندازه‌گیری شد. همچنین محتوای خاکستر آن ۷/۲۴ درصد و مواد جامد فرار (VS) ۹۲/۷۳ درصد به‌دست آمد که این نتایج قابل مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از کار سایر محققان[۱۵] و نشان‌دهنده غنی‌بودن مواد و ظرفیت بالای آن‌ها برای تولید بیوگاز است.

جدول ۵- نتایج اندازه‌گیری خواص فیزیکی مواد مورد استفاده در تولید بیوگاز

Table 5- Results of measurement of the physical properties of the materials used in the production of biogas

Row	Name of wastes	Weight (g)	Moisture content (%)	Total solid (%)	Volatile solid (%)	Ash content (%)	TS/VS (%)
1	Cow manure	20	80	20	92.73	7.27	.21
2	Mixed leftover foods	30	66.23	33.77	95.65	4.35	.35
3	Banana peel	3.8	82.58	17.42	89.15	10.85	.19
4	Tomato	7	86.84	13.16	92.48	7.52	.14
5	Green skin of walnut	2.29	84.52	15.48	83.86	16.14	.18
6	Rosemary	1.12	57.08	42.92	94.24	5.76	.45
7	Peppermint	13	47.13	52.87	92.48	7.52	.57
8	Bread	10	45.16	54.84	91.96	8.04	.59

نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۶ نشان‌دهنده ظرفیت تبدیل مواد و پسماندهای غذایی مورد استفاده به بیوگاز است. مقایسه نسبت اولیه و نهایی مقدار مواد جامد (TS) و مواد فرار (VS) نشان می‌دهد که مواد و پسماندهای غذایی تا چه میزان برای تبدیل‌شدن به بیوگاز کارآمدند و هرچه نسبت اختلاف مقدار اولیه با مقدار نهایی در فرایند بیشتر باشد می‌توان نتیجه گرفت که شرایط هضم بی‌هوازی مطلوب و پتانسیل مواد برای تبدیل به بیوگاز در محدوده بالا قرار دارد. در آزمایش‌های انجام‌شده مقدار نهایی TS/VS از دست‌رفته از ترکیب مخلوط پسماندهای غذایی و کود دامی ۰/۴۳ درصد تخمین زده شده است.

جدول ۶- بهره‌وری از کل مواد جامد و کاهش مواد جامد فرار

Table 6- Total solids productivity and volatile solids volatility

component	Food waste +cow manure		
	Initial %	Final %	Reduction%
TS	34.56	16.75	17.81
VS	95.13	53.81	41.32
TS/VS	0.36	0.31	0.43

با استناد به نتایج بالا می‌توان این‌گونه استنباط کرد که تولید بیوگاز غیرقابل‌اشتعال (عدم وجود گاز متان کافی در بیوگاز تولیدشده و بالابودن میزان گاز دی‌اکسیدکربن در آن) در دستگاه‌های بزرگ‌تر ممکن است به دلایل زیر باشد:

- وجودنداشتن تعداد کافی از باکتری‌های متانوژنیک که اسیداستیک و دی‌اکسیدکربن را به متان تبدیل می‌کنند.
- ترکیب نامناسب مواد و عدم مخلوط‌شدن یکنواخت مواد جامد یا جامدات هضم‌شده که باعث ایجاد حفره‌های خشک یا تشکیل سطح خشک روی لایه خروجی مخلوط و جلوگیری از خروج گاز تولیدی و درنهایت توقف تولید گاز می‌شود.
- عدم امکان تماس میکروارگانیسم‌ها با لایه‌های درونی مواد مورد استفاده در تولید بیوگاز
- نوسانات دمایی شدید که باعث کندشدن فعالیت میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها، کاهش بیوگاز تولیدی و درنهایت متوقف و مهارشدن سیستم می‌شود.

نتایج حاصل از کروماتوگرافی گازی (GC)

برای اندازه‌گیری میزان درصد گاز متان موجود در بیوگاز تولیدشده مقدار تقریبی ۶۰ سی‌سی میلی‌لیتر از گاز فوق را در ظرف درب‌دار شیشه‌ای با درپوش سوباسیلی نمونه‌گیری ذخیره کرده و با سرنگ هامیلتون به دستگاه کروماتوگرافی گازی تزریق شد. با آنالیز گاز تزریق‌شده به دستگاه کروماتوگرافی گازی میزان گاز متان، دی‌اکسیدکربن و نیتروژن به‌دست‌آمده به‌ترتیب ٪۶۶،

٪۳۳ و ٪۱ برآورد شد (شکل ۱۱). مبنای گاز آنالیزشده متان حاصل از کود دامی که به‌عنوان ماده شناخته‌شده با بیشترین درصد متان از بین ترکیبات مختلف در تولید بیوگاز را داراست درنظر گرفته شد.

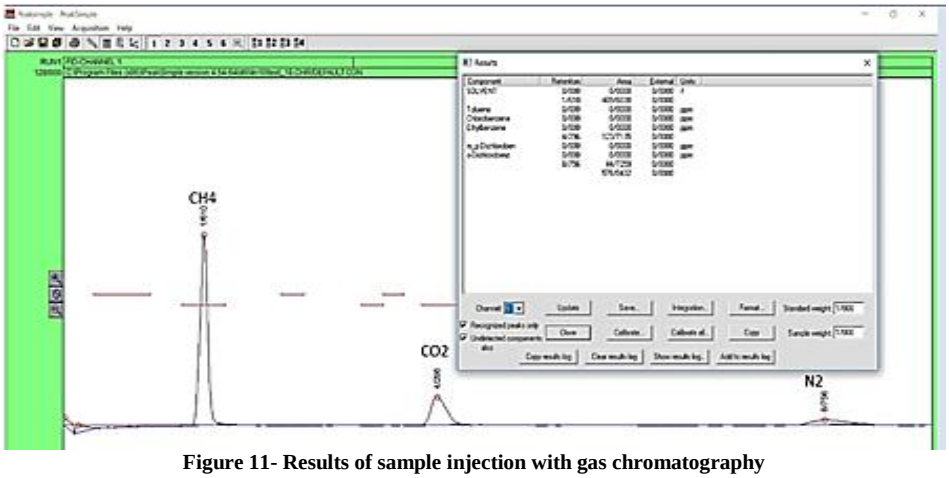

Figure 11- Results of sample injection with gas chromatography
شکل ۱۱- نتایج آنالیز نمونه بیوگاز تزریق شده به دستگاه کرموتوگرافی گازی

نتایج حاصل از آنالیز انرژی راکتور بیوگاز

پس از بارگذاری راکتور آزمایشگاهی با نسبت بهینه ۱:۱ مخلوط پسماندهای غذایی با کود گاوی با استفاده از معادلات و روابط حاکم بر آنالیز انرژی مقدار انرژی ورودی، که شامل انرژی الکتریکی حاصل از همزن برقی راکتور، انرژی الکتریکی هیتر برقی برای تامین حرارت راکتور، انرژی آب مصرفی، انرژی درونی مواد و پسماند غذایی و انرژی خروجی شامل کود غنی‌شده و بیوگاز تولیدی است، محاسبه شد. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده میزان بیوگاز تولیدی در هر دوره بارگذاری با تامین دمای ۶۰ درجه در راکتور به مقدار ۰/۰۲ مترمکعب و در مدت زمان بارگذاری ۶ روز قابل تخمین است.

انرژی الکتریکی همزن برقی با توان مصرفی ۱۰۰ وات‌برساعت و با زمان کارکرد روزانه به‌مدت ۱ساعت[۲۰] و انرژی الکتریکی مصرفی هیتر برقی، که مجهزبه ترموکوپل کنترل دماست، با استفاده از دستگاه توان‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری و محتوای انرژی پسماند غذایی و کود غنی‌شده دامی تخمین زده شد[۲۲،۲۱]. نتایج حاصل در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- نتایج محاسبه‌شده حاصل از آنالیز انرژی راکتور بیوگاز آزمایشگاهی ۴ لیتری (نسبت ۱:۱ پسماند غذایی با کود دامی)
Table 7- The calculated results obtained from the analysis of the energy of a 4-liter laboratory biogas reactor (FW/CM=1:1)

Input energy	Energy content kWh	Output energy	Energy content kWh
A mixture of food waste with cattle manure weighing 2kg	8.32	BIOGAS	4.97
Water consumption 2liters	.0023	Enriched fertilizer	5.55
Energy Consumption Electric Mixer	0.6	Heat loss	1.26
Energy consumption of the electric heater	2.86		
Input energy collection	11.78	Total output energy collection	11.78

برای محاسبه میزان بازده انرژی راکتور، میزان انرژی خروجی بیوگاز با استفاده از رابطه (۹) محاسبه و با برقراری نسبت بین انرژی بیوگاز خروجی و مجموعه انرژی‌های ورودی مقدار بازده انرژی ۴۲ درصد به‌دست می‌آید. بدیهی است برای سایر ترکیبات استفاده‌شده در این تحقیق، که باعث افزایش حجم بیوگاز تولیدی شده‌اند، بازده بیشتری به‌دست خواهد آمد. نتایج حاصل‌شده قابل مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از مراجع [۱۷] و [۲۳]، که بازده بین ۳۰ و ۶۱ درصد را گزارش کرده‌اند، است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به‌منظور پتانسیل‌سنجی به‌دست‌آوردن بیوگاز از پسماندهای غذایی و روش‌های موثر در افزایش حجم بیوگاز تولیدی آن و به‌دست‌آوردن شاخص بهره‌وری و بازده انرژی رآکتور بیوگاز، آزمایش‌هایی در دو مرحله انجام شد. مرحله اول برای یافتن نسبت ترکیب بهینه اختلاط پسماند غذایی و کود دامی است که طبق نتایج به‌دست‌آمده نسبت ترکیب ۱:۱ تولید بیشترین حجم بیوگاز را نشان داد. در مرحله دوم، با افزودن مقدار یکسان (۱۰ گرم) افزودنی شیمیایی سیلیکاژل و پسماندهای ارگانیک کشاورزی مانند گیاه رزماری، پوست‌گردو، پوست موز و گوجه، میزان حجم بیوگاز تولیدی اندازه‌گیری شد، که نتایج به‌دست آمده برای مواد ذکرشده به‌ترتیب از بیشترین مقدار (۲۴/۴٪) تا کمترین مقدار (۰/۶٪) حجم بیوگاز تولیدشده را نسبت به ترکیب اختلاط بهینه پسماند غذایی و کود دامی نشان داد. همچنین، نتایج نشان داد که افزودن پوست گردو، علاوه‌بر افزایش حجم بیوگاز تولیدی، موجب تثبیت pH مخلوط، کنترل و تثبیت آن در طول فرایند هضم خواهد شد.

مقدار بازده انرژی راکتور برای مخلوط بهینه پسماندهای غذایی با کود گاوی نیز براساس پتانسیل متان بیوگاز حاصل و اندازه‌گیری پارامترهای موثر در انرژی‌های ورودی راکتور ۴۲ درصد به‌دست آمد که با بازده سایر راکتورهای مشابه قابل مقایسه است.

از آزمایش‌های به‌عمل‌آمده از خواص فیزیکی مواد می‌توان نتیجه گرفت که پسماندها و دوریزهای غذایی منبع سرشار از انرژی نهفته است که با طراحی و ساخت راکتور بیوگاز پرتابل برای مناطق روستایی و مناطق دور از دسترس می‌توان ضمن کمک به بهبود مدیریت پسماند زباله، انرژی مورد نیاز آن‌ها را اعم از مصارف حرارتی و الکتریکی تامین کرد.

منابع

1. F. Tasnim, D. Salma and A. R. Chowdhury, "Biogas production from anaerobic co- digestion of cow manure with kitchen waste and Water Hyacinth," *Renewable Energy*, 109, 2017, pp. 434–439.
2. A. S. Saravay, "The status of food waste in Iran," *the second conference of the Management and Waste Management Organization*, Iran, Tehran, 9 Feb., 2017. (in Persian)
3. U. Onthong and N. Juntarachat, "Evaluation of biogas production potential from RAW and processed Agricultural Wastes USA Onthong Energy Procedia," *Energy Procedia*, 138, 2017, pp. 205–210.
4. P. C. Chan, R. Toledo, H. lnlu, H. Shlm, " Effect of Zinc Supplementation on Biogas Production and Short/ Long Chain Fatty Acids Accumulation During Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Domestic Wastewater," *Waste and Biomass Valorization*," 10, No. 12, 2019, pp. 3885-3895.
5. O. V. Sankinaa, "Usage of Farm Animal Waste for Biogas Production, IopConfSeries," *Earth and Environmental Science*, 8, 2017, pp. 2–4.
6. M. Łochyn´ ska and J. Frankowski, "The biogas production potential from silkworm waste," *Waste Management*, 79, 2018, pp. 564–570.
7. N. Khayum, S. Anbarasu, S. Murugan, "Biogas potential from spent tea waste: A laboratory scale investigation of codigestion with cow manure," *Energy*, 24, 2018, pp. 2-6
8. M. Arshada and I. Bano, "Electricity generation from biogas of poultry waste: An assessment of potential and feasibility in Pakistan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2018, pp. 1241–1246
9. F. A. Lattieff, "A study of biogas production from date palm fruit wastes," *Journal of Cleaner Production*, 139, 2016, pp. 1191–1195
10. A. E. Maragkaki, I. Vasileiadis, M. Fountoulakis and A. Kyriakou, "Improving biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge with a thermal dried mixture of food waste," *Cheese whey and olive mill wastewater journal*, 8, 2017, 1–8
11. S. Achinas and V. Achinas, "A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste," *Engineering*, 3, 2017, pp. 299–307
12. J. U. Ahamed, M. F. Raiyan, M. D. S. Hossain, M. M. Rahman and B. Salam, "Production of biogas from anaerobic digestion of poultry droppings and domestic waste using catalytic effect of silica gel," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15, 2016, 1–15.
13. N. Zhai, T. Zhang, D. Yin, G. Yang, "Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure," *Waste Management*, 6, 2015, pp. 1–6.
14. L. S. Clescerl, A. E. Greenberg, A. D. Eaton, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, Washington, DC, USA, 1998.

15. L. Dressa, S. Libsu, R. B. Chavan and D. Manaye, "Production of Biogas from Fruit and Vegetable Wastes Mixed with Different Wastes," *Environment and Ecology Research*, 7, 2015, pp. 65–71.
16. B. Claus and G. Sonnta, "Fundamentals of Thermodynamics," *Don Fowley*, 850, 1976, pp. 20–25.
17. N. Eva, J. Holgersson, E. Thorin, M. Thomassen and J. Yan, "Energy Efficiency Evaluation of two Biogas Plants," *Applied Energy*, 15, 2011, pp. 1661–1674.
18. E. Parmlind, "Energy analysis of farm-based biogas plants in Sweden," *Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences*, 50, 2014, pp. 19–21.
19. M. Fallah Rad, "Principles of Biogas Production and Its Application," Second International Fuel Consumption Conference in Building, Iran, Tehran, March 6, 2002. (in Persian)
20. R. Hazi Nia, M. Almasi and J. Nasiri, "Investigation of the agitation rate of materials in anaerobic digestion of biogas," *Seventh National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization*, University of Shiraz, September 16, 2012. (in Persian)
21. www.eia.gov, Accessed 29 September 2018.
22. https://energypedia.info/wiki/Cooking_with_Dung, Accessed 21 December 2018.
23. A. P. Rosa and C. A. L. Chernicharo, "Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant Renewable Energy," *Renewable Energy*, 124, 2018, pp. 21–26.

English Abstract

Energy analysis and experimental investigation on the effective parameters to improve process for biogas production from food waste

S. Mehdi Hasani[1], Masoud Iranmanesh*[2], Hossein Amiri[3] and Mahmoud Rahmati[4]
1- Energy Department, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, hasani.mahdi888@gmail.com
2- Energy Department, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, m.iranmanesh@kgut.ac.ir
2- Energy Department, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, hosseinamiri2010@gmail.com
3- Chemical Engineering Department, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, m.rahmati @ kgut.ac.ir
*Corresponding Author
(Received: 2018.12.17, Received in revised form: 2019.3.8, Accepted: 2019.5. 7)

An experimental investigation has been done on the effective parameters of biogas production from the mixture of food waste (FW), cow manure and organic additives. The samples of FW were collected from the university restaurant and they have mixed with the cow manure (CM) with different ratios of (FW/CM) 1:1, 1:2, 1:3, and 3:1 in a one liter polymeric bottle. These bottles embedded in a hot water bath at a thermophilic temperature of 55-60 ℃ in the period of 15 days and the volume of produced biogas was measured. The results were shown that with the ratio of 1: 1 the highest volume of gas was collected (5 liters). Then 10 grams of chemical additive of silica gel and organic additives like rosemary plant, walnut shells, and banana and tomato skin were added to the optimum selected ratio of digester. The produced biogas was increased 24.4%, 7.2%, 2.3%, 1.9% and 6.6% by volume respectively in compare with that of optimum based mixture. During the digestion process, it was found the highest volume of biogas was collected when the pH of the mixture was in neutral range (7) and the use of walnut shells resulted to pH stabilization in the process. Measuring physical properties (total solids, volatile matter, moisture content, and ash content), for the mixture of food waste and manure were shown the high capacity of food waste to convert to biogas based on the laboratory experiments.

Keywords: Food waste, Biogas, Organic additives, Energy analysis