مستخرج از پایان نامه

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و سوم، شماره دوازده، اسفند ماه ۱۴۰۰(۲۴۲-۲۲۷)

بررسی مناسب‌ترین تیمارهای مدت زمان استفاده از اولتراسونیک، دما و نسبت آب به محتویات شکمبه دام در تولید بیوگاز (مطالعه موردی: کشتارگاه شهر خرم‌آباد)

علی کوشکی [۱]

مرتضی الماسی [۲*]

morteza.almassi@gmail.com

محمد قهدریجانی [۳]

حمیدرضا شاملویی [۴]

تاریخ دریافت: ۹۹/۴/۲۵ **تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۵**

چکیده

زمینه و هدف: تصفیه بی‌هوازی برخی از ضایعات جامد کشتارگاهی مانند محتویات شکمبه، به دلیل پتانسیل تولید انرژی و تاثیر مثبت آن در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، یکی از گزینه‌های مناسب فرآوری و دفع ضایعات به شمار می‌آید. هدف از انجام این پژوهش، تعیین مناسب‌ترین تیمار دما، زمان و نسبت آب به محتویات شکمبه دام بر روی میزان تولید بیوگاز کل است.

روش بررسی: این پژوهش سال ۱۳۹۹و در کشتارگاه صنعتی خرم‌آباد انجام شد. پس از ذبح دام محتویات شکمبه پنج گاو و پنج گوسفند به منظور همگن‌سازی و یکنواخت شدن با هم مخلوط شدند و در آزمایش‌های مجزا به بررسی تاثیر شدت دماهای مختلف (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان‌های مختلف امواج‌دهی دستگاه اولتراسونیک (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) و نسبت‌های مختلف مخلوط محتویات شکمبه و آب(۵۰میلی لیتر آب به ۱۰۰ گرم محتویات شکمبه، ۱۰۰ میلی لیتر آب به ۱۰۰ گرم محتویات شکمبه و ۲۰۰ میلی لیتر آب به ۱۰۰ گرم محتویات شکمبه) برروند تولید بیوگاز پرداخته شد.

یافته‌ها: به طور کلی بیشترین مقدار بیوگاز کل، مربوط به اثر مقابل سه گانه استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3) × دمای ۵۰°C (te3) × نسبت ترکیب محتویات شکمبه$\frac{200ml}{100\ g}$ (r3) با میزان تولید ۳۵۰/۳۳۳ ml که بهترین نتیجه محسوب می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری: این نتایج نشان می‌دهد استفاده از پیش‌فرآوری اولتراسونیک در مدت زمان بیشتر، در دمای بالاتر و در غلظت کمتر تاثیر بیشتری در عملکرد فرآیند هضم بی هوازی و تولید بیوگاز کل از محتویات شکمبه دارد.

واژه‌های کلیدی: هضم بی‌هوازی، پیش‌فرآوری، ضایعات کشتارگاهی، اولتراسونیک، بیوگاز.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سیستم های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۲- استاد گروه مهندسی سیستم های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۳- استادیار گروه مهندسی سیستم های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۴- استادیار گروه شیمی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

J. Env. Sci. Tech., Vol 23, No.12, March, 2022

Investigating the most appropriate treatments for ultrasonic duration, temperature and water ratio to the contents of livestock rumen in biogas production (Case study: Khorramabad city slaughterhouse)

Ali Kooshki[1]
Morteza Almassi[2]*
morteza.almassi@gmail.com
Mohammad Ghahderijani[3]
Hamidreza Shamloui[4]

Admission Date:January 4, 2021 Date Received: July 15, 2020

Abstract

Background and Objective: Anaerobic digestion of slaughterhouse solid wastes, such as rumen contents, is an appropriate treatment option for managing such residues, because of their significant role in reducing the environmental impacts as well as the potential for biogas production. The objective of this study was determining the appropriate temperature, time and ratio of water to livestock rumen content on the total biogas production.

Material and Methodology: This study was conducted at the Khorramabad Industrial Slaughterhouse. After slaughtering livestock the contents of the rumen of five cows and five sheep were mixed together to homogenize and in separate experiments to examine the impact of severity different temperatures (30, 40 and 50° C), different times of Ultrasonic device waving (10, 20 and 30 minutes) and different ratios of mixing contents of rumen and water (50 ml of water to 100 g of rumen contents, 100 ml of water to 100 g of rumen contents and 200 ml of water to 100 g of rumen contents) in process of biogas production was discussed.

Findings: In general, the largest amount of total biogas, related to the triple opposite effect of using 30 minutes of ultrasonic pretreatment (t3) * C50 ° (te3) * Combination ratio of visceral contents $\frac{200ml}{100g}$ (r3) with production amount of 350/333 ml which is considered the best results.

Discussion and Conclusion: the finding indicated that the total biogas production from rumen content in the process of anaerobic digestion are more effected by the treatment under the conditions of a longer ultrasonic pretreatment, higher temperature and lower concentration.

Keywords: Anaerobic digestion; pretreatment; Slaughterhouse wastes; Ultrasonic; Biogas.

1- PhD student in Department of Agricultural systems engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Professor, Department of Agricultural systems engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. **(Corresponding Author)*
3- Assistant Professor, Department of Agricultural systems engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Chemistry, Lorestan University, Iran.

مقدمه

جهان با روند پرشتاب تقاضای انرژی روبروست؛ طبق پیش‌بینی آژانس انرژی تقاضای جهانی انرژی تا پایان دهه‌ی اخیر ۳۶ درصد افزایش خواهد یافت (۱). براساس گزارش‌های ارائه شده از ثابت قدم (۲۰۰۵)، ۵۳/۴ درصد از کل انرژی مصرفی در ایران از فرآورده‌های نفتی، ۳۶/۳ درصد از گاز طبیعی، ۱/۱ درصد از زغال، ۸/۹ درصد از انرژی الکتریسیته و۰/۲ درصد از انرژی‌های مدرن مانند انرژی خورشیدی، انرژی بیومس، انرژی باد و انرژی هسته‌ای است (۲). این برآوردها نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند موجود بشر در آینده‌ای نه چندان دور با فقر و ناامنی انرژی وابسته به سوخت‌های فسیلی مواجه خواهد شد که برون رفت از آن با تولید انرژی‌های تجدید پذیر ممکن خواهد بود. با توجه به منابع غنی انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران، در دهه گذشته تحقیق‌های زیادی در این زمینه انجام شده است و پایلوت‌های آزمایشی و صنعتی نیز در تولید و استفاده از این انرژی ساخته شده است. اما با توجه به جدید بودن این انرژی‌ها در ایران راه‌های زیادی برای تحقیقات و پیشرفت وجود دارد. به طوری که با استفاده از این انرژی‌ها در روستاهای دور دست نسبت به مراکز استان‌ها می‌توان هزینه-های انتقال انرژی را بسیار پایین آورد و امکانات مناسبی برای روستاییان فراهم نمود. بخش عظیمی از انرژی‌های تجدیدپذیر مربوط به فضولات دامی و گیاهی حاصل از فعالیت‌های دامپروری و کشاورزی است. در حالی‌که استفاده مستقیم از آنها در زمین‌های زراعی و باغی کشور ممکن است باعث انتقال برخی بیماری‌ها در سطح کشور شود و با انباشتن آنها در محیط برای پوسیدن باعث ایجاد و انتشار مقداری متان و دی اکسید کربن در اتمسفر گردد که این موضوع می‌تواند باعث تخریب لایه ازون شود. در صورتی که می‌توان با استفاده از فن‌آوری بی‌هوازی علاوه بر جلوگیری از خطرات فوق‌الذکر، حدوداً ۵۴ میلیون مترمکعب بیوگاز به‌دست آورد و به عنوان منبع انرژی استفاده نمود (۳). نظر به تقاضای روبه رشد گوشت در جهان، مقدار مواد زائد جامد آلی که ازصنایع تولید گوشت بوجود می-آید هر ساله در حال افزایش است که می‌توان اینگونه برآورد کرد، تقریباً بین ۲۰ تا ۵۰ درصد وزن حیوان برای مصرف انسان مناسب نیست (۴). در کشتارگاه های سطح کشور مواد زائد مختلفی از جمله کود حیوانی، باقیمانده کاه و کلش، محتویات شکمبه و غیره وجود دارند که پتانسیل خوبی برای تهیه انرژی در بخش داخلی هستند. با توجه به درصد بالای چربی و پروتئین موجود در پسماندهای کشتارگاه که یک بستر بسیار مناسب برای تولید بیوگاز به حساب می‌آیند و بیوگاز تولیدی آن دارای پتانسیل بالایی در تولید متان است، با این حال این روند تولیدی یک فرآیند بسیار حساس است و امکان شکست در آن بسیار زیاد است (۴).

در ادامه به برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه موضوع تحقیق پرداخته می‌شود. تاریخچه‌ی تولید بیوگاز به اوایل سده-ی نوزدهم برمی‌گردد که شخصی به نام دیوی در سال ۱۸۰۸ از طریق تخمیر کود گاوی و با استفاده از تقطیر در خلأ ۰/۳ لیتر گاز متان تولید کرد (۵). اما در ایران، به این موضوع کمتر بها داده شده است، زیرا انرژی فسیلی نفت و گاز به وفور در اختیار دولت بوده و این مسئله سبب شده کمتر برنامه‌ریزان دولتی و حتی محققین کشور به پژوهش در این زمینه توجه داشته باشند. غالب پژوهش‌ها در زمینه بیوگاز به صورت مقالاتی است که در همایش‌ها و کنفرانس‌ها ارائه شده است. با این اوصاف در گذشته در میان مناطق مختلف کشور به اشکال مختلف بیوگاز را تولید می‌کردند، به عنوان مثال حمام شیخ بهایی (مربوط به قرن یازدهم هجری) احتمالاً نخستین حمام بوده که بوسیله‌ی گاز متان گرم می‌شد. همچنین در مناطق روستایی از فضولات دام بعد از خشک کردن آن به عنوان منبع سوختی برای پخت و پز استفاده می‌کردند. اما اولین هاضم تولید متان به صورت نوین در سال ۱۳۵۴در روستای نیازآباد لرستان ساخته شد. در سال ۱۳۶۱ یک واحد۳ مترمکعبی در دانشگاه صنعتی شریف مورد مطالعه قرار گرفت (۵). Onurbas و Turker (۲۰۱۲) پتانسیل تولید بیوگاز از فضولات دامی را برای کشور ترکیه محاسبه کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که بیوگاز حاصل از فضولات دامی در این کشور حدود ۲/۱۸ میلیارد مترمکعب در

سال می‌باشد (۶). اشاره کرد. هضم بی‌هوازی فرآیند پیچیده‌ای است که توسط یکسری از میکروارگانیسم‌ها بدون حضور اکسیژن انجام می‌گیرد و طی آن ترکیبات آلی غیرحلال و پیچیده به ترکیبات محلول و ساده تبدیل می‌شوند که در نهایت منجر به تولید بیوگاز (متان، دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن و ..) می شود (۷). هضم بی‌هوازی شامل چهار مرحله هیدرولیز، اسیدوژنز، استوژنز و متانوژنز است (۸). در مراحل فوق مرحله هیدرولیز به عنوان عامل محدود کننده در فرآیند هضم بی‌هوازی به حساب می‌آید. برای حذف این محدودیت نیاز به انجام پیش‌فرآوری می‌باشد که بتوان به وسیله آن دیواره سلولی مواد اولیه را تخریب کرد تا مواد اولیه راحت تر در اختیار میکروارگانیسم‌ها قرار بگیرند و فرآیند هضم بی‌هوازی با سرعت بیشتری انجام گیرد (۹). برای پیش‌فرآوری مواد اولیه روش‌های متفاوتی وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. برخی از محبوب ترین این روش‌ها عبارتند از: پیش‌فرآوری اولتراسونیک، حرارتی، مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی(۱۳-۱۰). Pilli و همکاران در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که پیش‌فرآوری اولتراسونیک یک روش عملی و امیدوار کننده برای تخریب و فروپاشی ساختار لجن می‌باشد (۱۴). از خصوصیات مثبت این پیش‌فرآوری، تجزیه بهتر لجن و بهبود تجزیه بیولوژیکی، زمان ماند هیدرولیکی کمتر، افزایش تولید بیوگاز، افزایش متان، افزایش حذف مواد جامد کل و کاهش میزان لجن باقی مانده می‌باشد (۱۸-۱۴). هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر پیش‌فرآوری اولتراسونیک در زمان-های مختلف، تحت شرایط دمایی متفاوت و غلظت‌های متفاوت از محتویات شکمبه به آب، بمنظور دست‌یابی به مناسب‌ترین روش برای به حداکثر رساندن میزان بیوگاز تولیدی از این ضایعات در کشتارگاه شهر خرم آباد است. نظر به این که در این زمینه تاکنون پژوهش جامعی صورت نپذیرفته و این علم در کشور ما تازه در حال گسترش است انجام این گونه پژوهش‌ها می‌تواند تا حدودی بسیار زیادی راندمان تولید بیوگاز را در واحدهای تولیدی بالا برد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

کشتارگاه صنعتی خرم‌آباد در ۱۰ کیلومتری شهرستان خرم‌آباد می‌باشد. میانگین تعداد کشتار در کشتارگاه صنعتی خرم‌آباد روزانه برابر با ۴۵ تا ۷۰ رأس گاو و ۱۵۰ تا ۲۰۰ رأس گوسفند است. بنابراین میزان زائدات تولیدی نیز قابل توجه بوده و نیاز به مدیریت صحیح دارد. بعضی از زائدات حاصل از کشتار مثل استخوان جداسازی شده، فرآوری و تبدیل به غذای دام و طیور می‌شود. زائدات دیگری مثل پوست و سم دام نیز جداسازی شده و به مصارف خاص خود می‌رسند. بقیه زائدات حاوی خون و محتویات شکمبه وارد سیستم تصفیه‌خانه می‌شوند. سیستم تصفیه از نوع لجن فعال می‌باشد. فاضلاب ابتدا از سه آشغال‌گیر عبور کرده و زائدات درشت آن که حاوی محتویات شکمبه و خون بوده، در پشت میله‌های آشغال‌گیر به دام افتاده، جمع‌آوری شده و در محوطه کشتارگاه تلنبار می‌شود.

روش نمونه‌برداری

طرح حاضر در سال ۱۳۹۹ با هدف ارزیابی پتانسیل تولید بیوگاز از محتویات شکمبه کشتارگاه صنعتی شهرستان خرم‌آباد در سیستم ناپیوسته در مقیاس آزمایشگاهی صورت گرفت و سپس در آزمایش‌های مجزا به بررسی تاثیر شدت دماهای مختلف (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان‌های مختلف امواج‌دهی دستگاه اولتراسونیک (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) و نسبت-های مختلف مخلوط محتویات شکمبه و آب (۵۰ میلی لیتر آب به ۱۰۰ گرم محتویات شکمبه، ۱۰۰ میلی لیتر آب به ۱۰۰ گرم محتویات شکمبه و ۲۰۰ میلی لیتر آب به ۱۰۰ گرم محتویات شکمبه) بر سرعت فرآیند تولید بیوگاز از محتویات شکمبه پرداخته شد. در این پژوهش از روش آماری فاکتوریل 3^3 در قالب طرح کاملاً تصادفی برای بررسی مقایسه میانگین، تجزیه واریانس و با نرم افزار SAS نسخه 9.4 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای بدست آمدن نتایج دقیق، هر تیمار در سه تکرار انجام گرفت. در جدول ۱ به طور خلاصه تمام تیمارهایی که در طول مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته-اند، معرفی شده است. دام‌های موجود در کشتارگاه که در این

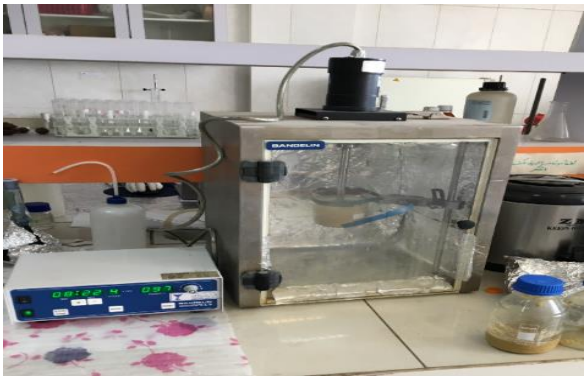
تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند از نقاط مختلف برای ذبح آورده و از مواد غذایی متفاوتی تغذیه شده‌اند همچنین نوع دام-های انتخاب شده متفاوت بود که هر دام جیره غذایی مخصوص به خود را دارد، بنابراین محتوای موجود در شکمبه دام‌ها شامل مواد مختلفی است. برای همگن‌سازی و یکنواخت شدن نمونه-های مورد استفاده در آزمایش، پس از ذبح دام در کشتارگاه، محتویات شکمبه پنج گاو و پنج گوسفند با هم مخلوط و مقدار مشخصی از آن برای آزمایش به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه-های آماده شده بعد از ترکیب شدن با آب و رسیدن به نسبت مورد نظر به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد توسط دستگاه بن ماری حرارت داده شدند. و بعد از آن بلافاصله بوسیله دستگاه اولتراسونیک با فرکانس پایین KHz ۲۰، مدل HD2200 رومیزی شرکت BANDELIN مجهز به نوک تیتانیومی مورد پیش‌فرآوری قرار گرفتند (شکل ۱). نمونه‌ها در ظروف آزمایشگاهی ریخته، سپس پروب اولتراسونیک را در مرکز ظرف و ۲ سانتی‌متر بالاتر از کف ظرف قرار داده و سوبسترای با غلظت‌های متفاوت، در سه زمان مختلف (۱۰ دقیقه، ۲۰ دقیقه و ۳۰ دقیقه) تحت پیش‌فرآوری اولتراسونیک قرار گرفت. پس از اتمام فرآیند پیش‌فرآوری بلافاصله نمونه‌ها به داخل هاضم‌ها انتقال داده شدند. و پس از آن برای شروع فرآیند هضم بی هوازی و اندازه گیری بیوگاز، هاضم ها به مدت ۱۵ روز در داخل دستگاه انکوباتور در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد (شکل ۲) نگهداری و در این مدت میزان بیوگاز تولیدی روزانه اندازه گیری گردید.

جدول ۱- متغیرهای مورد بررسی

Table 1. Examined variables

مخلوط آب و محتویات شکمبه(r)	دما (te)	زمان پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t)
$\frac{50\ ml}{100\ g}$(r1)	30°c (te1)	10 min (t1)
		20 min (t2)
		30 min (t3)
	40°c (te2)	10 min (t1)
		20 min (t2)
		30 min (t3)
	50°c (te3)	10 min (t1)
		20 min (t2)
		30 min (t3)
$\frac{100\ ml}{100\ g}$(r2)	30°c (te1)	10 min (t1)
		20 min (t2)
		30 min (t3)
	40°c (te2)	10 min (t1)
		20 min (t2)
		30 min (t3)
	50°c (te3)	10 min (t1)
		20 min (t2)
		30 min (t3)
$\frac{200ml}{100\ g}$ (r3)	30°c (te1)	10 min (t1)
		20 min (t2)
		30 min (t3)
	40°c (te2)	10 min (t1)

20 min (t2)		
30 min (t3)		
10 min (t1)	50°c (te3)	
20 min (t2)		
30 min (t3)		



شکل ۱- دستگاه اولتراسونیک

Figure 1. Ultrasonic device

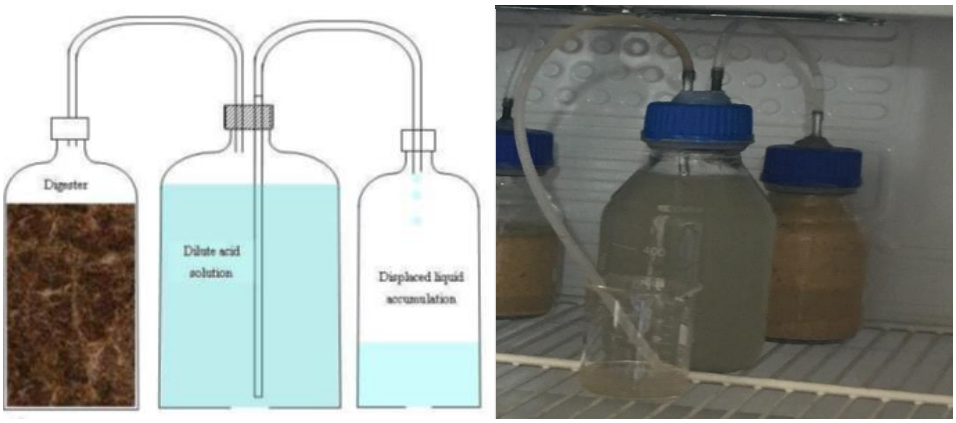
شکل ۲- دستگاه انکوباتور (دمای ۳۷c°)

Figure 2. Incubator device (temperature 37°c)

راه‌اندازی هاضم‌ها و اندازه‌گیری بیوگاز تولیدی

دستگاه هاضمی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، هاضم جریان ناپیوسته در مقیاس آزمایشگاهی بود که توسط مک‌لود و همکاران، ۲۰۱۵ شرح داده شده است (۱۹). روش اندازه‌گیری بیوگاز که به طور خلاصه در شکل ۳ نشان داده شده است شامل یک راکتور بی‌هوازی کوچک، یک بطری جابجایی مایع و یک بطری ذخیره مایع جابجا شده می‌باشد. هاضم‌ها با سوبسترا پر شدند و قبل از این که درپوش آنها بسته شود بطری‌ها به مدت دو دقیقه با گاز نیتروژن (با خلوص ۹۹/۹ درصد) پر شدند تا محیط بی‌هوازی شود. یک بطری آزمایشگاهی به حجم ۵۰۰ میلی لیتر که کاملاً از آب پر شده از یک طرف به وسیله لوله پلاستیکی به هاضم وصل شده و از طرف دیگر به بطری ذخیره مایع جابجا شده متصل شده است. تمام بطری‌ها و لوله‌های رابط به وسیله چسب عایق بندی، آب بندی شدند. در هاضم تولید بیوگاز (بطری اول)، به مرور زمان بیوگاز تولید شده، که باعث ایجاد فشار و جابجایی آب در بطری دوم (بطری ۵۰۰ میلی لیتری) شده و آب از طریق لوله

پلاستیکی به بطری سوم جابجا می‌گردد. به وسیله این روش میزان بیوگاز تولیدی روزانه اندازه‌گیری گردید. همه هاضم‌ها در انگوباتور در دمای ۱±۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند (۹).



شکل ۳- هاضم اندازه‌گیری بیوگاز

Figure 3. Biogas measurement digestion

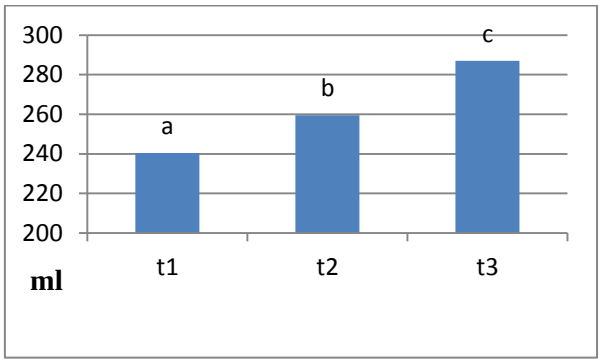
نتایج

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که از نظر میزان تولید بیوگاز در روز پانزدهم (پایان پروژه) بین تمام تیمارها، به جز تیمار درجه اول دما×زمان در سطح یک درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد، همچنین بین تیمار درجه اول دما×زمان با سایر تیمارها نیز در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

جدول ۲- آنالیز واریانس بین تیمارهای مورد مطالعه و اثر ترکیبی آنها

Table 2. Variance analysis between the studied treatments and their combined effect

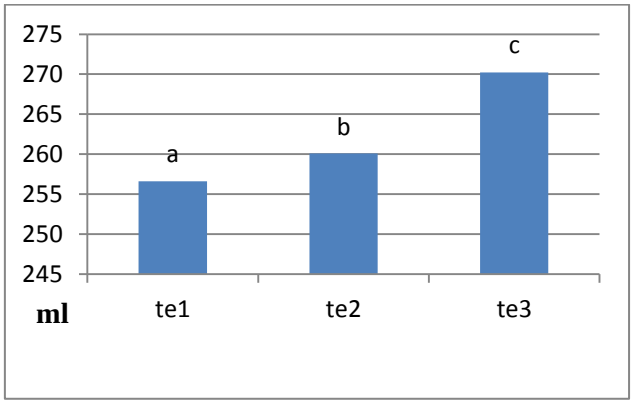
منبع	مجموع مربعات	دامنه	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
زمان	۲۹۵۸۹/۰۴۳	۲	۱۴۷۹۴/۵۲۲	۱۰۱۵/۳۴۱	۰/۰۰۰
دما	۲۷۰۲/۱۵۴	۲	۱۳۵۱/۰۷۷	۹۲/۷۲۴	۰/۰۰۰
نسبت	۴۵۴۵۳/۸۵۸	۲	۲۲۷۲۶/۹۲۹	۱۵۵۹/۷۳۸	۰/۰۰۰
دما ×زمان	۲۰۸/۴۲۰	۴	۵۲/۱۰۵	۳/۵۷۶	۰/۰۱۲
نسبت ×زمان	۳۱۸۳۲/۰۴۹	۴	۷۹۵۸/۰۱۲	۵۴۶/۱۵۵	۰/۰۰۰
نسبت ×دما	۱۹۷۵/۱۶۰	۴	۴۹۳/۷۹۰	۳۳/۸۸۹	۰/۰۰۰
زمان× دما ×نسبت	۶۹۵/۳۲۱	۸	۸۶/۹۱۵	۵/۹۶۵	۰/۰۰۰



شکل ۴- نمودار تغیر بیوگاز کل نسبت به زمان

Figure 4. Total biogas change chart over time

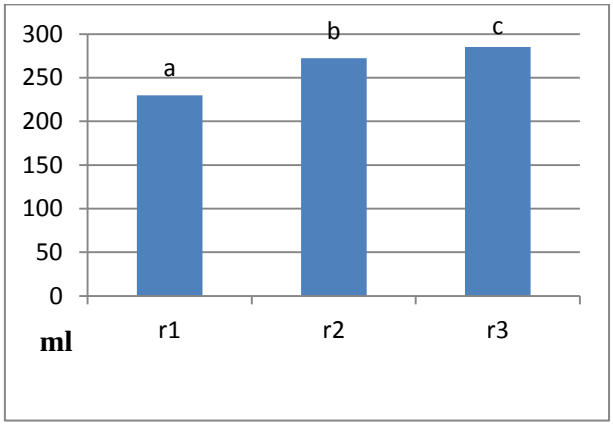
براساس شکل ۴ مشاهده می‌شود که استفاده ۱۰ دقیقه‌ای از دستگاه اولتراسونیک باعث تولید ۲۴۰/۳۹۸ میلی‌لیتر بیوگاز شده، استفاده ۲۰ دقیقه‌ای باعث تولید ۲۵۹/۵۵۶ میلی‌لیتر بیوگاز و استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک باعث تولید ۲۸۶/۹۶۳ میلی‌لیتر بیوگاز در در طول فرآیند هضم بی هوازی شده است، و بین هر سه تیمار اختلاف معنی داری وجود دارد. بالاترین میزان بیوگاز تولیدی مربوط به استفاده ۳۰ دقیقه ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3) می‌باشد که میزان آن ۲۷/۴۷ میلی لیتر بیشتر از تیمار t2 (استفاده ۲۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک) و ۴۶/۵۷۴ میلی‌لیتر بیشتر از تیمار t1 (استفاده ۱۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک) می‌باشد. همچنین تیمار t2 (استفاده ۲۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک) باعث تولید بیوگاز بیشتر به میزان ۱۹/۱۶۷ میلی‌لیتر نسبت به تیمار t1 (استفاده ۱۰ دقیقه‌ای از پیش-فرآوری اولتراسونیک) شده است.



شکل ۵- نمودار تغیر بیوگاز کل نسبت به دما

Figure 5. Total biogas change chart relative to temperature

بر اساس شکل ۵ مشاهده می‌شود که تیمار اول دما باعث تولید ۲۵۶/۶۱۱ میلی لیتر بیوگاز شده، تیمار دوم دما باعث تولید ۲۶۰/۰۷۴ میلی لیتر بیوگاز و تیمار سوم باعث تولید ۲۷۰/۲۲۲ میلی لیتر بیوگاز در طول فرآیند هضم بی هوازی شده است، و بین هر سه تیمار اختلاف معنی داری وجود دارد. بالاترین میزان بیوگاز تولیدی مربوط به دمای ۵۰°C (te3) می‌باشد که میزان آن ۱۰/۱۴۷ میلی لیتر بیشتر از تیمار te2 (دمای ۴۰°C) و ۱۳/۶۱۱ میلی‌لیتر بیشتر از تیمار te1 (دمای ۳۰°C) می‌باشد. همچنین تیمار te2 (دمای ۴۰°C) باعث تولید بیوگاز بیشتر به میزان ۳/۴۶۳ میلی‌لیتر نسبت به تیمار te1 (دمای ۳۰°C) شده است.

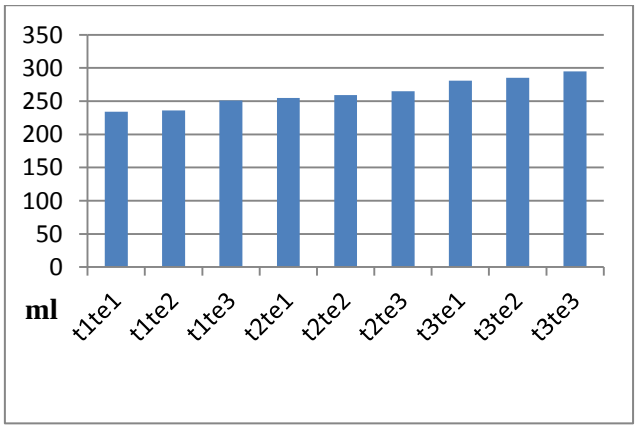


شکل ۶- نمودار تغیر بیوگاز کل نسبت به ترکیب محتویات شکمبه به آب

Figure 6. Chart of change of total biogas to the composition of the contents of the intestines and viscera

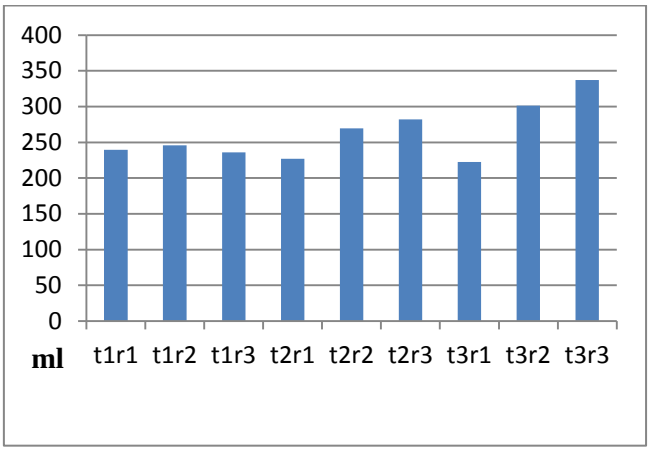
براساس شکل 6 مشاهده می‌گردد که تیمار اول نسبت باعث تولید ۲۲۹/۶۴۸ میلی‌لیتر بیوگاز شده، تیمار دوم باعث تولید ۲۷۲/۱۴۸ میلی‌لیتر بیوگاز و تیمار سوم باعث تولید ۲۸۵/۱۱۱ میلی‌لیتر بیوگاز در طول فرآیند هضم بی‌هوازی شده است، و بین هر سه تیمار اختلاف معنی داری وجود دارد. بالاترین میزان بیوگاز تولیدی مربوط به نسبت $\frac{200\text{ml}}{100\ g}$ (r3) می‌باشد که میزان آن ۱۲/۹۶۳ میلی لیتر بیشتر از تیمار r2 (نسبت $\frac{100\text{ ml}}{100\ g}$) و ۵۵/۴۶۳ میلی‌لیتر بیشتر از تیمار r1 (نسبت $\frac{50\text{ ml}}{100\ g}$) می‌باشد. همچنین تیمار r2 (نسبت $\frac{100\text{ ml}}{100\ g}$) باعث تولید بیوگاز بیشتر به میزان ۴۲/۵ میلی‌لیتر نسبت به تیمار r1 (نسبت $\frac{50\text{ ml}}{100\ g}$) شده است.

در ادامه شکل‌های (۱۰-۷)، شکل اثر دوجانبه و سه جانبه‌ی دما، زمان و نسبت ترکیبات امعاء و احشا به آب بر تولید بیوگاز کل ترسیم شده است.



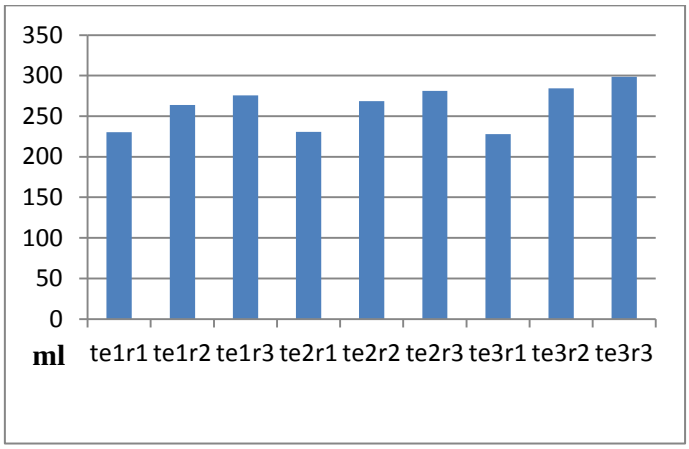
شکل ۷- نمودار تغیر مواد بیوگاز کل نسبت به اثر دوجانبه زمان و دما

Figure 7. Chart change of total biogas materials relative to the bilateral effect of time and temperature



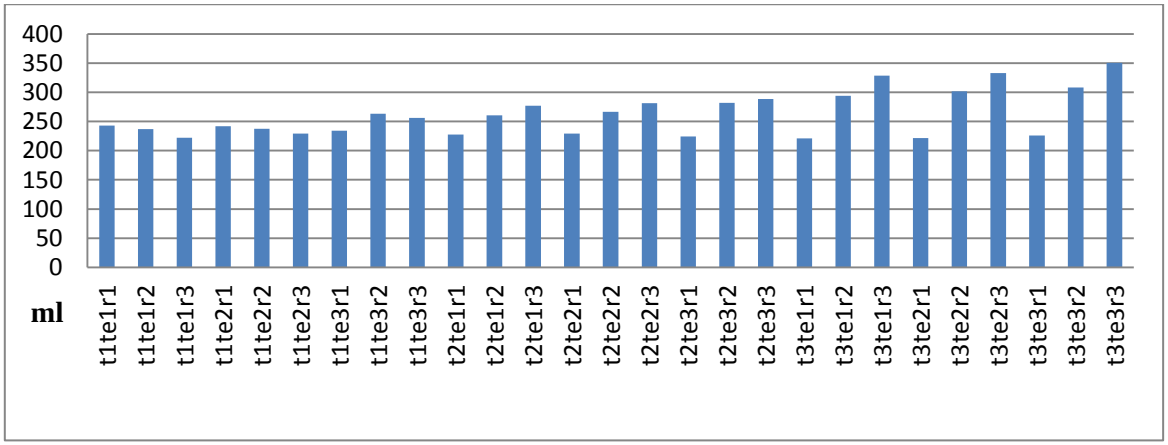
شکل ۸- نمودار تغیر بیوگاز کل نسبت به اثر دوجانبه زمان و ترکیب محتویات شکمبه به آب

Figure 8. Changing the total biogas ratio to the bilateral effect of time and combining the contents of the radiation and viscosity into water



شکل ۹- نمودار تغیر بیوگاز کل نسبت به اثر دوجانبه دما و ترکیب محتویات شکمبه به آب

Figure 9. Chart of total biogas change in relation to the bilateral effect of temperature and the composition of the contents of the radiation and viscosity to water



شکل ۱۰- نمودار تغیر بیوگاز کل نسبت به اثر سه جانبه زمان، دما و ترکیب محتویات شکمبه به آب

Figure 10. Chart of total biogas change relative to the three-dimensional effect of time, temperature, and composition of water and viscosity content

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود بیشترین میزان بیوگاز کل اثرات سه جانبه پس از پایان پروژه به ترتیب مربوط به، اثر متقابل استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3)، دمای ۵۰°C (te3) و نسبت ترکیب محتویات شکمبه $\frac{200ml}{100\,g}$ (r3) با میزان تولید ۳۵۰/۳۳۳ میلی‌لیتر، اثر متقابل استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3)، دمای ۴۰°C (te2) و نسبت ترکیب محتویات شکمبه $\frac{200ml}{100\,g}$ (r3) با میزان تولید۳۳۲/۶۶۷ میلی‌لیتر، و اثر متقابل استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3)، دمای ۵۰°C (te1) و نسبت ترکیب محتویات شکمبه $\frac{200ml}{100\,g}$ (r3) با میزان تولید ۳۲۸/۳۳۳ میلی‌لیتر، می‌باشد. با توجه به شکل ۹ بیشترین میزان بیوگاز کل برای اثر دوجانبه دما (te) × نسبت ترکیب محتویات شکمبه (r)، مربوط به اثرمتقابل دمای ۵۰°C (te3) و نسبت ترکیب محتویات شکمبه $\frac{200ml}{100\,g}$ (r3) با میزان تولید ۲۹۸/۴۴۴ میلی‌لیتر است. بر اساس شکل ۸ مشاهده می‌گردد که بیشترین میزان بیوگاز کل برای اثر دوجانبه زمان استفاده از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t) × نسبت ترکیب محتویات شکمبه (r)، مربوط به اثرمتقابل استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3) و نسبت ترکیب محتویات شکمبه $\frac{200ml}{100\,g}$ (r3) با میزان تولید ۳۳۷/۱۱۱ میلی‌لیتر است. همچنین با توجه به شکل ۷ بیش ترین میزان بیوگاز کل برای اثر دو جانبه زمان استفاده از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t) × دما (te) مربوط به اثر متقابل استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3) و دمای ۵۰°C (te3) با میزان تولید ۲۹۴/۶۶۷ میلی‌لیتر می‌باشد.

بحث

جهت کاهش پسماند شهری و مضرات آن، تولید پاتوژن کمتر در محیط و کاهش آلودگی حاصل از آن می‌توان از هضم بی-هوازی به عنوان روش مناسب و جذاب به خصوص در کشورهای در حال توسعه استفاده کرد (۲۰). بیوگاز عمدتاً مخلوطی از سه ترکیب متان، دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن است. قسمت اعظم این گاز عموماً از متان و گاز کربنیک تشکیل شده است و ترکیبات مختلف آن بستگی به نوع مواد اولیه‌ای دارد که برای تولید گاز مصرف می‌شود (۲۱). تبدیل ضایعات آلی به بیوگاز در بسیاری از جنبه‌ها دارای اهمیت است: اول آن که بیوگاز به دلیل داشتن ارزش حرارتی بالا می‌تواند به عنوان سوخت مورد استفاده قرار گیرد و جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی می‌باشد؛ دوم آن که استفاده از این فناوری اثرات اجتماعی قابل توجهی در حوزه حفظ محیط زیست و کمک به سلامت انسان از طریق دفع بهداشتی فضولات خواهد داشت و سوم آن که لجن خروجی از واحدهای بیوگاز، کودی غنی شده‌ای خواهد بود که می‌تواند بازده محصولات کشاورزی را افزایش دهد (۲۲). یکی از عمده‌ترین معضلات تولید بیوگاز از فضولات دام مدت زمان طولانی فرآیند هیدرولیز است که منجر به کاهش راندمان تولید بیوگاز می‌شود. استفاده از پیش تیمار مناسب اولتراسونیک به عنوان یکی از روش‌های کارگشا در کاهش مدت زمان هضم به اثبات رسیده است (۲۳). همان گونه که در این تحقیق مشاهده می‌شود پیش تیمار زمان اولتراسونیک بر سرعت هیدرولیز فضولات دام یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر در تولید بیوگاز است. در این پژوهش استفاده ۳۰ دقیقه‌ای ازپیش‌تیمار اولتراسونیک ۲۸۶/۹۶۳ میلی‌لیتر بر گرم بیوگاز تولید کرد که در مقایسه با پیش تیمار ۱۰ دقیقه‌ای و ۲۰ دقیقه‌ای به نسبت ارزش عددی بالاتری دارد. ایرانشاهی و همکاران (۲۳)، پیش تیمار ۳۰ دقیقه‌ای اولتراسونیک را مناسب‌ترین پیش تیمار برای تولید بیوگاز برآورد کردند. در تحقیقاتی که توسط Tiehm و همکاران انجام گرفت، این نتیجه به دست آمد که استفاده بیشتر از اولتراسونیک باعث افزایش بیشتر بیوگاز در مقایسه با نمونه شاهد خواهد بود (۲۴). در تحقیقات دیگر، استفاده از دستگاه اولتراسونیک برای پیش-فرآوری کاه ذرت به روش بی‌هوازی بمنظور تولید بیوگاز در مدت زمان ۳۰ دقیقه باعث افزایش ۲۴۰/۳۲ میلی لیتری در تولید بیوگاز کل نسبت افزایش ۱۴۱/۶۵ میلی لیتری نمونه شاهد گردید (۲۵). که این نتایج با یافته های حاصل از این تحقیق هم‌خوانی دارد. دما نیز یکی از فاکتورهای مهم در تولید

بیوگاز است. در تولید بیوگاز سرعت واکنش تحت تاثیر دما قرار می‌گیرد. به علاوه دما بر روی قابلیت حل فلزات سنگین (سمی)، دی اکسید کربن و در نتیجه بر روی ترکیب گاز تاثیر می‌گذارد (۲۶). افزایش دمای محیط موجب تشدید واکنش و در نتیجه افزایش تولید گاز می‌شود (۲۷). بهترین درجه حرارت در این پژوهش برای دمای سوم (۵۰درجه‌ی سانتی‌گراد) ثبت شد. نظری هریس (۱۳۹۳)، افزایش دما را عامل بسیار موثری در افزایش راندمان تولید بیوگاز می‌داند البته اگر که این دما یکنواخت و پایدار وارد شود (۲۸). Liao و همکاران با بررسی تیمارهای دمایی مختلف به این نتیجه رسیدند که دماهای بالاتر باعث انحلال بهتر مواد آلی و تولید بیوگاز بیشتر در فرآیند هضم بی‌هوازی می‌گردد (۲۹). محققان دیگر دریافتند که در دمای $50^{\circ}C$ مواد آلی موجود در سوبسترا بهتر حل می‌شوند و لیپیدها به اسیدهای چرب فرار تبدیل می‌شوند و باعث افزایش میزان بیوگاز کل می‌گردد (۳۰، ۳۱). که این نتایج با یافته های حاصل از این تحقیق هماهنگ می‌باشد. فاکتور موثر دیگری که در این پژوهش بررسی شد نسبت آب به محتویات شکمبه دام بود که بهترین عملکرد را در تولید بیوگاز نسبت ۲۰۰ میلی‌لیترآب به ۱۰۰ گرم امعا و احشا بود. از این نظر می‌توان گفت‌که آب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها و بقای آنها ضروری است. به علاوه برای حرکت باکتری‌ها فعالیت آنزیم‌های سلولی اضافی، هیدراسیون بیوپلیمرها برای تسهیل شکست آسان‌تر ضروری است (۲۶). مقدار آب مناسب احتمالاً در مواد مختلف با توجه به خواص شیمیایی و سرعت تجزیه متفاوت است. اگر آب خیلی زیاد باشد دمای میانگین مخلوط و در نتیجه بیوگاز تولیدی کم می‌شود. اگر آب خیلی کم باشد اسیدهای فعال انباشته می‌شوند و فرآیند تخمیر را به تاخیر می‌اندازند. برای اغلب سیستم‌های بیوگاز نسبت ایده آل یک به یک ماده و آب مناسب است (۲۷، ۳۲، ۳۳). ولی در این پژوهش نسبت دو به یک بازده بیشتری داشت، علت آن هم می‌تواند تفاوت در نوع ماده آلی به کار رفته برای تولید بیوگاز باشد. از جنبه دیگر با افزایش نسبت آب به محتویات شکمبه میزان تولید بیوگاز افزایش می‌یابد. این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش میزان آب مقدار اسیدی بودن محتویات شکمبه به نسبت کم شده و در محیط قلیایی‌تر تخریب‌پذیری زیستی بهبود می‌یابد (۲۰). این فرآیند بسیار پیچیده بوده و شامل واکنش‌های متعددی مانند حل شدن پلی-ساکاریدهای تجزیه نشده، هیدرولیز پیوندهای گلیکوزیدی و گروه‌های استیل و نیز تجزیه پلی‌ساکاریدهای حل شده است (۳۴). نتایج مطالعات Rongping و همکاران (۲۰۱۰)، نیز موید این پژوهش است. آنها نیز این پدیده را این گونه توجیه نمودند که اگر محیط حالت اسیدی پیدا کند، باکتری‌های بی-هوازی از بین می‌روند و تولید متان کاهش می‌یابد و با ادامه این روند تولید متوقف خواهد شد (۳۵). در مطالعات میبدی و همکاران (۱۳۹۲) حتی به افزودن آهک به فضولات دامی برای بالا بردن راندمان تولید بیوگاز به واسطه حالت قلیایی آن نیز اشاره شده است (۳۶). آب یکی از عناصر اصلی جهت تغذیه میکروارگانیسم‌ها است. وجود آب برای حرکت باکتری‌ها، فعالیت آنزیم‌های سلولی، هیدراسیون بیوپلیمرها و همچنین تسهیل شکست سلول‌ها ضروری است (۲۶). به طور کلی نتایج نشان داد که عوامل گوناگونی بر تولید متان ناشی از واکنش‌های بی‌هوازی در یک هاضم موثر هستند و تاثیر متقابل این عوامل باعث تغییر راندمان تولید بیوگاز می‌شود. همان‌گونه که از نتایج حاصل از این تحقیق مشخص است، در بین روش‌هایی که بیشترین میزان بیوگاز را داشته‌اند فاکتورهای: استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک، دمای $50^{\circ}C$ و نسبت ترکیب محتویات شکمبه $\frac{200ml}{100\ g}$ در همه آنها مشترک است. به طور کلی بیشترین مقدار بیوگاز کل تولیدی، مربوط به اثر مقابل سه گانه استفاده ۳۰ دقیقه‌ای از پیش‌فرآوری اولتراسونیک (t3) × دمای $50^{\circ}C$ (te3) × نسبت ترکیب محتویات شکمبه $\frac{200ml}{100\ g}$(r3) با میزان تولید ۳۵۰/۳۳۳ میلی‌لیتر که بهترین نتیجه محسوب می‌شود. Gong و همکاران در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با کاهش میزان مواد جامد به مایع در لجن فاضلاب میزان بیوگاز تولیدی افزایش می‌یابد (۳۷). بر اساس مطالعات مختلف و در شرایط آزمایشگاهی این نکته ذکر گردیده که استفاده از دستگاه اولتراسونیک در غلظت‌های پایین مواد جامد باعث افزایش تولید بیوگاز در شرایط آزمایشگاهی

شده است (۳۸). محققان دریافتند که با افزایش دمای نمونه-های لجن اثر پیش‌فرآوری اولتراسونیک بیشتر شده و این امر باعث بهبود فرآیند هضم بی‌هوازی می‌گردد (۴۱-۳۹). در تحقیقات دیگر نیز محققان دریافتند استفاده ترکیبی از پیش-فرآوری حرارتی همراه با حرارت دادن نمونه‌ها باعث بهبود فرآیند هضم بی‌هوازی و افزایش میزان بیوگاز تولیدی از جلبک-های می‌گردد (۴۲). همان گونه که مشخص است نتایج سایر محققان با نتایج حاصل از این تحقیق هم‌خوانی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که تولید بیوگاز از ضایعات کشتارگاه با استفاده از پیش‌فرآوری اولتراسونیک در شرایط دمایی مختلف و ترکیب نسبت‌های مختلف شکمبه با آب نتایج متفاوتی دارد و در صورتی که شرایط مساعد فراهم شود باعث افزایش تولید بیوگاز تولیدی می‌شود.

References

1. Popzan, A., Moradi, K. h., Doroghi, B., 2012. Design and implementation of native plants Biogas: Achievements applications in the use of biogas in rural areas of countrys. Fourth national conference on bio-energy, Tehran, 20-26. Tehran.
2. Sabetghadam, M., 2005. Energy abd sustainable development in Iran. Sustainable Energy Watch.
3. Asl Hashemi, A., Religion, A., 2010. Application of Mathematical Formulas in Biogas Production. Application of Chemistry in the Environment, 2 (5): 39-50. (In Persian)
4. Igliński, B., Buczkowski, R., Iglińska, A., Cichosz, M., Piechota, G., Kujawski, W., 2012. Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 7, Pages 4890–4900.
5. Omrani, Gh., Safa, M., Gulpaigani. F., 2006. Evaluation of efficacy payrvby kind of mechanical agitator for biogas devices to Chinese model. Journal of Ecology. 32(20):20-26.
6. Onurbas A., A and Turker, U. 2012. Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 3, Pages 1557–1561.
7. Khanal, S. K., 2008, Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production, published by John Wiley & Sons.
8. Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T. (2012), 'Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production', Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16(3), 1462–1476.
9. Le, N. T., Julcour-Lebigue, C., Delmas, H., 2015. An executive review of sludge pretreatment by Sonication. Journal of Environmental Sciences, Elsevier, 2015, 37, pp.139-153. 10.1016/j.jes.2015.05.031. hal01878564.
10. Pham, A. T., 2011. Sewage sludge electro-dewatering. PhD Thesis. Mikkeli University Consortium, Mikkeli, Finland (Available at: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/72598/ isbn%209789522651693 pdf? sequence=2. Dateassessed29t.2013).
11. Rynkiewicz, M. 2011. Application of constant electric fielding Simultaneous intensification of dewatering of wastewater Sludge and filtrate purification. Environ. Prot. Eng. 37(3),93–100.

12. Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D. J., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., et al., 2010. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. J. Hazard.Mater.183 (1–3),1–15.
13. Salerno, M. B., Lee, H. S., Parameswaran, P., Rittmann, B. E., 2009. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved bio solids digestion and methanogens. Water Environ. Res. 81 (8),831–839.
14. Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R. J., Tyagi, R. D., Surampalli, R. Y., 2011. Ultrasonic pretreatment of sludge: a review. Ultrason. Sonochem.18 (1), 1–18.
15. Khanal, S. K., Grewell, D., Sung, S., Van Leeuwen, J., 2007. Ultrasound applications in waste water sludge pretreatment: a review. Crit.Rev.Environ.Sci.Technol.37 (4), 277–313.
16. Barber, W.P., 2005. The effects of ultrasound on sludge digestion. Water Environ. J.19(1),2–7.
17. Onyeche, T.I., Schläfer, O., Bormann, H., Schröder, C., Sievers, M., 2002. Ultrasonic cell disruption of stabilized sludge with subsequent anaerobic digestion. Ultrasonics40 (1–8), 31–35.
18. Tiehm, A., Nickel, K., Neis, U., 1997. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge. Water Sci. Technol. 36(11),121–128.
19. McLeod JD, Othman MZ, Beale DJ, Joshi D (2015) The use of laboratory scale reactors to predict sensitivity to changes in operating conditions for full-scale anaerobic digestion treating municipal sewage sludge. Bioresource Technology 189:384–90. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.049
20. Ahmadi-Pirlou M., Ebrahimi-Nik M., Khojastehpour, M., Ebrahimi, S., 2007. Effect of Alkaline Pretreatment on Improvement of Biodegradability of Organic Fraction of Municipal Solid Wastes and Biogas Production in Anaerobic Digestion. ijhe. 9 (4) :481-492. (In Persian)
21. Abbaspour, M., 2007. Environmental Energy and Sustainable Development. First Edition. Scientific Publications Institute of Amir Kabir University of Technology. Tehran. Pp. 696-693. (In Persian)
22. Askariani, M., Tahmasebi, H.A and Khosrowyar, S., 2012. Investigation of hydrogen sulfide removal from biogas using biological processes, the third Iranian bioenergy conference (biomass and biogas). Iran, Tehran, Proceedings. (In Persian)
23. Iranshahi, Z., Rasapour, M., Adl, M and Pazuki, m. 2016. Evaluation of the effects of ultrasonic precursor application on urban waste hydrolysis rate in order to increase the yield of biogas produced, 3rd Conference of Iranian Scientific Energy Association, Iranian Scientific Association, Tehran. (In Persian)
24. Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, Neis U. 2001. Ultrasonic waste activated sludge degradation for improving anaerobic stabilization. Water Resources. 35(8): 2003-2009.
25. Zou, S., Wang, X., Chen,Y., Wan, H., Feng, Y., 2016. Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion by ultrasonic pretreatment. Energy Conversion and Management. 112, 15 March 2016, Pages 226-235
26. Marzban Shirkhakolai, Sh., Saeb, K and Ardestani, F. 2014. Providing appropriate instructions for biogas

production (review study). Third Iranian Bioenergy Conference (Biomass and Biogas). (In Persian)

27. Najafpour, Q and Saseh, L. 1995. Installation of biogas units. Publications of Amir Kabir University of Technology (Tafresh Branch and Mazandaran University of Science and Technology). (In Persian)
28. Nazary Harris, Sh. 2014. Production of biogas from livestock waste in areas with cold climates. Master's thesis. University of Tabriz, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery Engineering, 100 p. (In Persian)
29. Liao, X., Li, H., Zhang, Y., Liu, C., Chen, Q., 2016. Accelerated high-solids anaerobic digestion of sewage sludge using low-temperature thermal pretreatment. international Bio deterioration & Biodegradation 106 (2016) 141-149. http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.023
30. Appels, L., Degreve, J., Van der Bruggen, B., Van Impe, J., Dewil, R., 2010. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. Bioresour. Technol. 101, 5743e5748.
31. Ferrer, I., Ponsab, S., Vazquezc, F., Fontb, X., 2008. Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. Biochem. Eng. J. 42, 186e192.
32. Adgad, O, N., Sponza, D. T., 2007. co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. J Hazard mater. 140:75-85.
33. Xie, s. G., wu. p. G., Lawlor. J. p, frost. x, Zhan. Methane production from anaerobic co-digestion of the separated solid fraction of pig manure with dried grass silage. Bioresource technology 2012; 104:289-297
34. Cesaro, A., Belgiorno, V., 2013. Sonolysis and ozonation as pretreatment for anaerobic digestion of solid organic waste. Ultrasonics Sonochemistry. 20(3):931-36.
35. Rongping, L., C. Shulin and L. Xiujiu. 2010. Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system. Applied Biochemistry and Biotechnology.160:643-654.
36. Meybodikalantari, S., Danesh, Sh., Ebrahimi, S.H and Heydarian, A. 2013. Evaluation of the effect of total solid and lime content on biogas production from cow rum content. 4th National Conference on Bioenergy of Iran (Biomass and Biogas), Kimia Energy Thinkers, Tehran. (In Persian)
37. Gong, L., Yang, X., Wang, Z., Zhou, J., You, X., 2019. Impact of hydrothermal pre-treatment on the anaerobic digestion of different solid–liquid ratio sludge's and kinetic analysis. Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/C9RA01662G
38. Cesaro, A., Velten, S., Belgiorno, V., Kuchta, K., 2014. Enhanced anaerobic digestion by ultrasonic pretreatment of organic residues for energy production, Journal of Cleaner Production, http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.030(In press).

39. Grönroos, A., Kyllönen, H., Korpijärvi, K., Pirkonen, P., Paavola, T., Jokela, J., et al., 2005. Ultrasound assisted method to increasesoluble chemical oxygen demand (SCOD) of sewage sludge for digestion. Ultrason. Sonochem. 12 (1–2), 115–120.
40. Kidak, R., Wilhelm, A.M., Delmas, H., 2009.Effect of process parameters on the energy requirement in ultrasonical treatment of waste sludge. Chem. Eng. Press. 48 (8), 1346–1352.
41. Li, H., Jin, Y.Y., Mahar, R. B., Wang, Z.Y., Nie, Y.F., 2009. Effects of ultrasonic disintegration on sludge microbial activity and dewater ability. J. Hazard. Mater. 161 (2–3), 1421–1426.
42. Wu, N. Y., Mattsson, M., Ding, M. W., Wu, M. T., Mei, J., Shen, Y. L., 2019. Effects of Different Pretreatments on Improving Biogas Production of Macroalgae Fucus vesiculosus and Fucus serratus in Baltic Sea. Energy Fuels 2019, 33, 3, 2278–2284. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04224.