Research Article

Agricultural Engineering., 46(3) (2023) 327-342

DOI: 10.22055/AGEN.2024.45415.1695

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Investigating the effect of digester stirring on biogas production from bean skin

M. Malekzadeh[1], R. Yeganeh[2,*], B. Ghamari[3] and Sh. Ghavami Jolandan[4]

1. Former MSc., Department of Biosystem Engineering, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran.
2. Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran.
3. Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, ilam University, Iran,
4. Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

Received: 1 December 2023 Accepted: 31 December 2023 *Corresponding Author: r.yeganeh@ilam.ac.ir

Abstract

Currently, achieving clean and economical energy resources is a primary goal for countries, especially those in development. The global energy consumption has seen a significant increase in recent years due to population growth and industrial development in both developed and developing countries. Bio-gas, derived from organic carbon-containing materials such as agricultural, industrial, and domestic waste, stands out as a vital renewable energy source. Bio-gas offers unique advantages, including the preservation of natural resources, environmental protection, renewable energy generation, and non-toxicity.

This research focuses on investigating the influence of lentil skin on the production of bio-gas and its constituent components. Digesters with a uniform volume of approximately 14 liters were prepared, equipped with devices for measuring pH and gas volume. The experiment was conducted under controlled conditions with an average temperature of 28-30 degrees Celsius. The digestion process involved loading digesters with a mixture of 7 kilograms of lentil skins and water in a 1:1 ratio. The experiment was performed in three replicates, utilizing fixed digesters, digesters with vibrations every three days, and digesters with daily vibrations as influencing factors. The process duration was set at 30 days. Throughout the procedure, pH changes and gas pressure were recorded every three days, with gas quantity and constituent components data collected every ten days.

Gas chromatography was employed to identify the constituent components of bio-gas, including propane, methane, carbon dioxide, and ethane. Some digesters exhibited trace amounts of nitrogen, iso-butane, and n-butane with very low percentages. Results indicated that digester vibrations directly affect pH levels, with digesters vibrating daily experiencing the highest pH and the most significant variations. Additionally, digester vibrations have a direct impact on bio-gas production, enhancing structural effects within the digester. However, increased vibration frequency has a negligible effect on bio-gas production. The average methane production in this process was 34.06 mol% for digesters vibrating daily, 23.09 mol% for digesters vibrating every three days, and 17.32 mol% for fixed digesters.

Introduction: Biogas is a natural and cost-effective source of energy that leaves significant impacts on the environment and industries, widely produced and utilized in many countries. This gas is generated through the anaerobic digestion of organic materials, including animal manure, food waste, and sewage. Microorganisms play a crucial role in the biogas production process by feeding on biomass. The digestion carried out by these

© 2023 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

microorganisms produces methane, constituting approximately 50-70% of biogas, which is flammable and used for cooking, cooling and heating, electricity generation, methanol and steam production, waste management, and mechanical power. Biogas production leads to the reduction of pathogenic factors (flies, worm eggs), conversion of organic waste into high-quality fertilizer, preservation of vegetation cover, soil, and water, increased efficiency in livestock and agriculture, and, most importantly, a decrease in dependence on fossil fuels and mitigation of greenhouse gas effects, among many other advantages. Given these benefits, biogas production holds special significance, and extensive research has been conducted globally in this field, yielding valuable results. In the present study, we aim to investigate and evaluate the influence of lentil skin as a biomass on the quantity and constituents of produced biogas.

Materials and Methods: This research was conducted in the Biosystems Mechanics Workshop of the Faculty of Agriculture, Ilam University. To control environmental conditions, a dedicated room in the workshop was allocated, ensuring temperature control throughout the experiment. The objective of this study was to investigate the effect of lentil skin on biogas production and analyze its constituent components.

The workflow typically comprised four stages. In the first stage, fresh lentil skins were broken down into smaller pieces and stored in a suitable environment to be used as digester feedstock for the experiment. Shredding organic waste aids in the digestion process. The second stage involved providing optimal conditions for microbes, which require warmth. Accordingly, the temperature was maintained at an average of 28-30 degrees Celsius during the experiment.

The third stage involved the actual digestion process, where anaerobic digestion took place in large tanks, resulting in real biogas production. For this purpose, materials were combined in predetermined proportions (1:1) and loaded into the digesters. In each stage, 5 kilograms of lentil skin were combined with 5 kilograms of water and added to the digester. The experiment was conducted in three repetitions, employing fixed digesters, digesters with agitation every three days, and digesters with daily agitation as influencing factors.

The quantity of biogas production and its components were examined over a 30-day period. Gas sampling occurred every 10 days, while pH and gas pressure were measured every 72 hours. In the final stage, the gas underwent purification by removing impurities and carbon dioxide. The amount of gases produced from lentil skin was measured using a chromatograph with a TCD detector. This instrument employs chromatography-based separation. It's worth noting that 9 gas capsules specifically designed for automobiles were used to construct the digesters. The construction stages of the digesters included cleaning, coloring, and installing connections. Moreover, to create uniform temperature and concentration conditions inside the tank, inlet and outlet connections were carefully designed and installed. A safety valve was also installed to ensure the safety of the digesters.

Results and Discussion: The obtained results, including loading conditions, pH levels, and internal pressure within the digester during the experiment, and the quantity and components of biogas, were examined across all samples. Statistical methods, including Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan's mean comparison test, were employed for data analysis. The results indicated that digester agitation directly influences the pH levels, with the highest pH observed in digesters with daily agitation, displaying the most significant fluctuations.

Furthermore, digester agitation has a direct impact on the biogas production levels, enhancing structural effects within the digester. However, frequent agitation repetition has a negligible effect on the amount of biogas produced. The average methane production rates in this process were 34.06% mol for digesters with daily agitation, 23.09% mol for digesters with agitation every three days, and 17.32% mol for fixed digesters.

Conclusion: Currently, a significant portion of the world's energy demand is met through fossil fuels, the combustion of which releases carbon dioxide and various pollutants, including sulfur and nitrogen oxides, which are highly harmful. Consequently, in recent years, there has been a growing inclination towards utilizing various renewable energy sources. One crucial energy source that also provides a solution for waste reduction is biogas. Given the increasing importance of sustainable energy development and the need for waste management, anaerobic digestion technology and biogas production have rapidly grown. Therefore, the findings of this research underscore the importance of exploring innovative methods and utilizing diverse biological resources in managing and optimizing the biogas production process.

Keywords: Biogas, lentil skin, methane, digester

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۶ شماره۳، پاییز ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

بررسی تاثیر همزدن هاضم بر تولید بیوگاز از پوست باقلا

مجتبی ملک‌زاده[۱]، رضا یگانه[۲*]، بهرام قمری[۳] و شعبان قوامی جولندان[۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
۳- استادیار ،گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
۴- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز ،اهواز، ایران

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

کلمات کلیدی:

بیوگاز،

پوست باقلا،

متان،

هاضم

* عهده‌دار مکاتبات

Email: r.yeganeh@ilam.ac.ir

چکیده

بیوگاز یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر و مهم می‌باشد که می‌توان آن را با استفاده از مواد ضایعاتی نظیر مواد آلی کربن‌دار از منابعی چون پسماند دامی، کشاورزی، صنعتی و خانگی تولید کرد. بر آن اساس در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر پوست باقلا و لرزش هاضم بر میزان تولید بیوگاز و اجزاء تشکیل‌دهنده آن پرداخته شد. برای این منظور، ۹ هاضم با حجم یکسان حدود ١٤ لیتر با قابلیت اندازه‌گیری pH و حجم گاز تولیدی آماده‌سازی شد. آزمایشات در شرایط کنترل شده با دمای میانگین ۲۸-۳۰ درجه سلسیوس با بارگذاری هاضم‌ها به مقدار ۷ کیلوگرم پوست باقلا و آب با نسبت ۱:۱ انجام شد. آزمایش در سه تکرار و با اثر عامل هاضم‌های ثابت، هاضم‌های با لرزش هر سه روز یکبار و هاضم‌های با لرزش هر روز انجام گرفت. مدت زمان نگهداری فرآیند تا پایان ۳۰ روز تعیین گردید. در طول فرآیند، تغییرات pH و فشار گاز هر سه روز یکبار ثبت گردید و برای تعیین میزان و اجزاء تشکیل‌دهنده گازها هر ده روز یکبار داده‌گیری انجام گرفت. برای شناسایی اجزاء تشکیل‌دهنده بیوگاز، از دستگاه کروماتوگرافی استفاده شد. نتایج حاکی از تأثیر مقدار لرزش بر میزان PH درون هاضم داشت. بیشترین مقدار مربوط به هاضم با لرزش هر روز بوده و تغییرات در این هاضم با pH= ٦/٧٨ دارای بالاترین مقدار بود. همچنین، لرزش هاضم‌ها تأثیر معنی‌داری بر میزان تولید بیوگاز داشته و تاثیرات ساختاری درون هاضم را بهبود بخشید. اما تکرار زیاد لرزش در مقدار تولید بیوگاز تأثیر معنی‌داری نداشت. میانگین میزان تولید متان در این فرآیند در هاضم‌های با لرزش هر روز ٣٤/٠٦ درصد مول، هاضم‌های با لرزش سه روز یکبار ۲۳/۰۹ درصد مول و هاضم‌های ثابت ۱۷/۳۲ درصد مول بود. در کل نتایج نشان داد که لرزش هاضم‌ها بهبود قابل توجهی در تولید بیوگاز و متان ایجاد کرده و تأثیر مثبتی بر pH و ساختار داخل هاضم دارد.

مقدمه

تولید بیوگاز به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک، در دنیای امروز برای مقابله با چالش‌های انرژی و محیط‌زیست از اهمیت چشمگیری برخوردار است. بیوگاز، به وسیله‌ی تجزیه‌ی بی‌هوازی مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شود و دارای پتانسیل بالایی برای تأمین انرژی سوختی است(۵). از جمله موادی که می‌تواند به عنوان ماده اولیه در تولید بیوگاز استفاده شود، پوست باقلا است که به عنوان خوراک دام نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، تأثیر پوست باقلا و همزدن هاضم بر میزان و اجزاء تشکیل‌دهنده بیوگاز تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات گذشته نیز نشان داده است که میزان تولید بیوگاز متاثر از عوامل مختلفی است که شامل نوع مواد آلی، دما و ماند هیدرولیکی می‌شوند. محمودی و همکاران[۱] طی تحقیقاتی بیان داشتند که ترکیبات فرار، شرایط محیطی شامل دما و pH و همچنین عناصر موجود در ترکیبات می‌توانند بر میزان متان تولیدی اثرگذار باشند(۸). هاشمی و همکاران[۲] (۱۳۹۵) طی تحقیقاتی به بهبود تولید اتانول و بیوگاز از کاه گلرنگ با استفاده از فرآوری با سود سوزآور پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از پیش‌فرآوری با سود سوزآور در دمای مناسب، می‌توان تولید اتانول و بیوگاز را بهبود داد (۴). آمو و همکاران[۳] (۲۰۲۳) در تحقیق خود به بررسی تأثیر ترکیب متغیرهای فرآیند بر تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی ضایعات غذایی و محتویات شکمبه پرداختند. از یک طرح مخلوط برای ارزیابی تأثیرات دما، pH، فرکانس هم‌زدن، و زمان ماند بر کمیت و کیفیت بیوگاز استفاده شد. آزمایش‌ها با استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی پلاستیکی تک‌مرحله‌ای ۲ لیتری اجرا شدند. شرایط بهینه شامل ضایعات غذایی (۰,۳۰ کیلوگرم)، محتوای شکمبه (۰,۳۰ کیلوگرم)، محتوای آب (۰,۴۰ کیلوگرم)، دما (۳۴,۰ درجه سانتیگراد)، pH (۰.۹)، همزدن (۴ بار در روز) و زمان نگهداری (۳۲ روز) بود. ترکیب متغیرهای فرآیند به طور معنی‌داری بر کمیت و کیفیت بیوگاز تأثیر گذاشت و پارامترهای بهینه فرآیند به شرایط و بستر مختلف وابسته بودند. محتویات هاضم‌ها به صورت دستی چندین بار در روز تکان داده می‌شدند تا اختلاط و تولید بیوگاز را افزایش دهند(۱). صفری و عبدی (۱۳۹۵) نیز به مقایسه تولید بیوگاز از بقایای کلزا و گندم در ترکیب با کود دامی پرداختند. آنها دریافتند که بقایای کلزا از پتانسیل بالاتری نسبت به گندم برای تولید بیوگاز برخوردار است (۱۴). کرمی بوژانی و همکاران[۴] (۱۳۹۳) به بررسی تولید بیوگاز از دو نوع کود مرغی و کود گاوی با استفاده از هاضم فلزی و PVC پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که تولید بیوگاز از فضولات مرغی بیشتر از فضولات گاوی بوده و هاضم PVC با چرخش شیرابه بهترین عملکرد را داشته است (۶). در تحقیقی دیگر صالحی و همکاران[۵] (۱۳۹۴) تولید بیوگاز از زباله آشپزخانه و کود گوسفند در مقیاس آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار دادند آنها دریافتند که ترکیب و مقادیر مختلف از عناصر موجود در مواد می‌تواند بر میزان تولید بیوگاز تأثیرگذار باشد(۱۵). طادی بنی و همکاران[۶] (۱۳۹۸) در طی پژوهشی در تولید بیوگاز از باگاس نیشکر دریافتند که میزان تولید گاز در دمای ترموفیل و مزوفیل اختلاف معنی دار دارد و تولید بیوگاز در روش‌های پیش فرآوری شده با روش پیش فرآوری نشده در هر دو دما اختلاف معنی دار دارد(۱۶). پوردی و همکاران[۷] (۲۰۱۸) طی تحقیقاتی به امکان سنجی بازیافت انرژی از زباله‌های زیستی در یک مزرعه شیری پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در مزرعه شیری می‌تواند از زباله‌های زیستی برای تولید بیوگاز استفاده کرده و از این انرژی به عنوان منبع برق و گرمایش در مزرعه خود بهره‌برداری کرد(۱۳). گورینی و همکاران[۸] (۲۰۱۸) توانستند پتانسیل تولید بیوگاز از باغ انگور را بررسی کنند. این تحقیق

1 Mahmoudi *et al.*
2 Hashemi *et al.*
3 Amoo *et al.*
4 Karami *et al.*
5 Bojani Salehi *et al.*
6 Tadibani *et al.*
7 Purdy *et al.*
8 Guerini *et al.*

نشان داد که می‌توان از ضایعات باغ انگور به منظور تولید بیوگاز بهره‌برد و از آن به عنوان یک منبع انرژی استفاده کرد(۳). مینسینی و همکاران[1] (۲۰۱۸) روش‌های پیش فرآوری شیمیایی برای تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی کاه گندم را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که حل کردن مولکول سلولز و حذف کریستال‌های لیگنین تأثیر مثبتی بر تولید بیوگاز دارد(۱۰). تربوون و همکاران[2] (۲۰۱۷) طی تحقیقاتی به بررسی تولید بیوگاز از سیلوهای چغندرقند با استفاده از رآکتور جدید بستر ثابت مزوفیل و ترموفیلیک پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که تغذیه با نسبت‌های مختلف می‌تواند به افزایش تولید بیوگاز منجر شود و متان بیشتری تولید شود (۱۸). تسنیم و همکاران[3] (۲۰۱۷) تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی کود گاو با زباله‌های آشپزخانه و سنبل آبی را بررسی کردند. آنها دریافتند که مخلوطی از کود گاوی، زباله‌های آشپزخانه، و سنبل آبی می‌تواند به میزان زیادی بیوگاز تولید کند (۱۷). در پژوهش انجام شده توسط لطیف[4] (۲۰۱۶) تولید بیوگاز از پسماند میوه‌های نخل خرما مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق ایشان نشان داد که ترکیب‌های مختلف از میوه‌های نخل خرما می‌توانند به میزان زیادی بیوگاز تولید کنند (۷). ملک‌زاده و همکاران[5] (۱۳۹۸) طی تحقیقاتی به بررسی تاثیر درصد کود گاوی در ترکیب با باگاس نیشکر و دمای محیط درون بیوراکتورها بر حجم بیوگاز تولیدی پرداختند. نتایج نشان داد که در سطح یک درصد اثر دما و نسبت کود به باگاس بر مقدار بیوگاز تولید شده اختلاف معنی‌داری دارد (۹). تحقیق انجام شده توسط نومن و همکاران[6] (۲۰۲۳) در خصوص تولید بیوگاز از پسماند گاو با استفاده از یک راکتور پیش‌پردازنده نشان داد که با اجرای فرآیند همزدن راکتور، می توان به بالای ۵۲ درصد بیومتان تولید شده دست یافت، که نشان دهنده افزایش تولید بیوگاز از پسماند گاو با استفاده از این روش است (۱۲). وانگ و همکاران[7] (۲۰۱۶) طی تحقیقی به افزایش تولید بیوگاز از ساقه ذرت با استفاده از پرولیز سریع فاضلاب پرداختند. انها دریافتند که پرولیز سریع فاضلاب می‌تواند تولید بیوگاز را افزایش دهد (۱۹). مقدم و همکاران[8] (۱۳۹۱) میزان تولید بیومتان از ترکیب ضایعات سیب زمینی و کود گاوی را بررسی کردند و دریافتند که این ترکیب به میزان زیادی بیوگاز تولید می‌کند (۱۱). تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که میزان تولید بیوگاز به عوامل مختلفی بستگی دارد و متغیرهایی از جمله نوع مواد آلی، دما و ماند هیدرولیکی بر میزان تولید آن تاثیر دارند. تحقیقات متنوع در زمینه تولید بیوگاز از منابع آلی مختلف و نتایج حاصل از آنها نقش مهمی در افزایش اثرات محیط‌زیستی بر تولید بیوگاز ایفا می‌کنند و به توسعه فناوری‌های پایدارتر در زمینه تولید انرژی کمک می‌کنند. از این رو، ارزیابی اثر لرزش هاضم بر تولید بیوگاز و اجزاء تشکیل دهنده از پوست باقلا که در راستای تحقیقات ذکر شده بوده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کارگاه مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام انجام شد و برای کنترل شرایط محیطی، اتاقکی در کارگاه تخصیص داده شد تا دما در طول آزمایش تحت نظارت باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پوست باقلا بر تولید بیوگاز و تحلیل اجزاء تشکیل‌دهنده آن بود. برای ساخت هاضم‌ها، از ۹ عدد کپسول‌های گاز کولر مخصوص خودروها استفاده شد (شکل۱). مراحل ساخت هاضم شامل تمیزکاری، رنگ‌آمیزی و نصب اتصالات بر روی آنها بود. برای ورود و خروج مواد از داخل مخزن بیوگاز، یک درب با هدف راحتی کار و جلوگیری از نشتی گاز با دقت طراحی و اجرا شد. شیر اطمینان نیز به منظور ایمنی هاضم نصب شد. تجهیزات و اتصالات استفاده شده در ساخت هاضم در جدول ۱ آورده شده است. ابعاد هندسی

1 Mancini *et al.*
2 Terboven *et al.*
3 Tasnim *et al.*
4 Lattieff
5 Malekzadeh *et al.*
6 Nauman *et al.*
7 Wang *et al.*
8 Moghadam *et al.*

هاضم و مشخصات کلی آن در جدول ۲ ارایه شده است. حجم کلی هاضم بر اساس مشخصات محاسبه شد و برابر با ۱۴ لیتر (معادل ۱۴ کیلوگرم) تعیین گردید. پوست باقلا تازه از مزارع شهرستان دره‌شهر تهیه و در محیطی مناسب نگه‌داری شد تا برای آزمایش به عنوان خوراک هاضم‌ها مورد استفاده قرار گیرد. برای ضمانت یکسانی میزان رطوبت در شروع آزمایش، رطوبت اولیه برای شروع فرآیند هضم در پوست باقلا به مقدار ۸۹ درصد بر پایه تر اندازه‌گیری شد.

شکل(۱) هاضم استفاده شده (مخزن و تجهیزات کنترل)
Figure(1) Used digester (tank and control equipment)

جدول(۱) فهرست تجهیزات و اتصالات
Table(1) List of equipment and connections

نوع اتصالات (Type of connections)	خصوصیات (Specification)
شیر اطمینان (*safety valve*)	ماکزیمم ۴ بار (*Maximum pressure 4 bar*)
فشارسنج (*Barometer*)	۰-۴ بار (*0-4 bar*)
شیر تخلیه (*drain valve*)	$\frac{۱}{۲}$ اینچ (*1/2 inch*)

جدول(۲) مشخصات کلی هاضم
Table(2) Digester general characteristics

طرح هاضم (*digestive plan*)	استوانه ای (*Cylindrical*)
جنس هاضم (*Digester body material*)	فولاد (*Steel*)
ارتفاع (*Height*)	۳۳سانتی‌متر (*33 cm*)
قطر (*Diameter*)	۲۴ سانتی‌متر (*44 cm*)
حجم کلی (*Total volume*)	۱۴ لیتر (*14 liter*)

برای بررسی عوامل مؤثر بر میزان و اجزاء تشکیل‌دهنده بیوگاز، نوع ماده اولیه و نوع هاضم مورد آزمایش قرار گرفت. عواملی همچون رطوبت اولیه (برای شروع فعالیت میکروارگانیسم‌ها، رطوبت آماده شد)، اندازه‌گیری درصد رطوبت، تغییرات فشار داخل هاضم و اندازه‌گیری روند تغییرات pH مورد بررسی قرار گرفت. مواد به میزان معینی با نسبت ۱:۱ ترکیب شده و در هاضم بارگذاری شد (۲). در هر مرحله، ۵ کیلوگرم از پوست باقلا با ۵ کیلوگرم آب ترکیب شده و به هاضم افزوده شد. دما در طول آزمایش با متوسط دمای میانگین محیط ۳۰-۲۸ درجه سلسیوس متغیر بود. پس از بارگذاری، مقدار تولید بیوگاز و ترکیبات آن در مدت ۳۰ روز بررسی شد.

در فرایند تولید گاز، ۹ هاضم مورد استفاده در آزمایش با توجه به جدول ۳ مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌برداری گاز تولیدی هر ۱۰ روز یک بار و اندازه‌گیری pH و فشار گاز هر ۷۲ ساعت انجام شد. برای اندازه‌گیری حجم بیوگاز تولید شده، از کیسه‌های سوند بیمارستانی استفاده شد و گاز تولیدی درون کیسه‌ها جمع‌آوری و سپس در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری و تخلیه شد (شکل ۲).

میزان گازهای تولید شده از پوست باقلا با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی و دتکتور TCD اندازه‌گیری شد. این دستگاه از جداسازی بر مبنای کروماتوگرافی استفاده می‌کند (شکل ۳). در نهایت برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.1 و Excel 2013 استفاده شد.

جدول(۳) خصوصیات فنی تکنیک‌های تکان‌دادن در فرآیند تولید گاز

Table(3) Technical Specifications of Shaking Techniques in Gas Production Process

نحوه اجرا (Execution Method)	مدت زمان تکان (Shaking Duration)	تکان‌دادن (Shaking)	تعداد هاضم (Digestion Quantity)
-	-	بدون تکان(Without Shaking)	سه(Three)
با دست(with Hands)	۲۰ ثانیه(20 seconds)	۳ روز یکبار(Every 3 Days)	سه(Three)
با دست(with Hands)	۲۰ ثانیه(20 seconds)	روزانه یکبار(Daily)	سه(Three)

شکل(۲) ذخیره بیوگاز تولید شده

Figure(2) Storing the biogas produced

شکل(۳) دستگاه کروماتوگرافی
Figure(3) Chromatography device

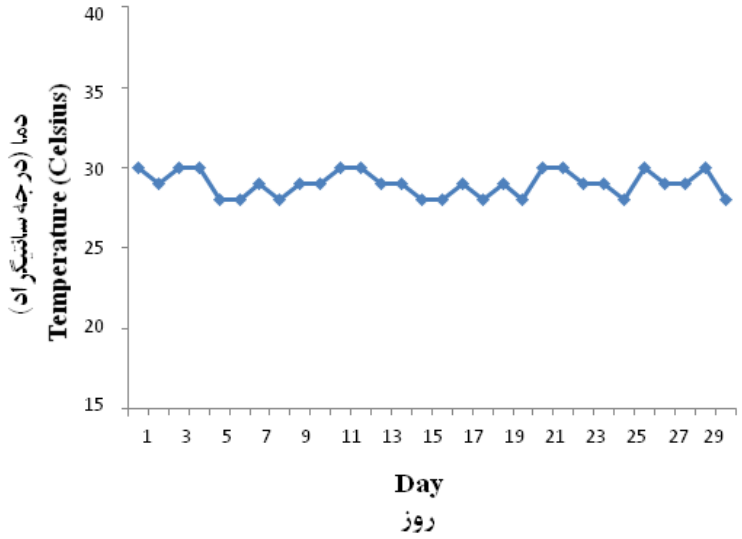
نتایج و بحث

نتایج حاصل از بارگذاری، میزان pH، فشار داخل هاضم در طول آزمایش و میزان و اجزاء بیوگاز در تمام نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. داده‌ها به وسیله روش‌های آماری شامل آزمون تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) و آزمون مقایسه میانگین دانکن تجزیه و تحلیل شدند. همچنین، تأثیر نوع هاضم در ارتعاش آنها بر میزان تولید بیوگاز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری تغییرات دمای محیط در طول آزمایش در شکل ۴ نمایش داده شده است. متوسط دمای محیط در طول دوره‌ی آزمایش برای پوست باقلای تازه در ماه‌های شهریور و مهر ۲۸-۳۰ درجه سلسیوس گزارش شده است. تغییرات دمای محیط در طول آزمایش از اهمیت خاصی برخوردار بوده و نمایانگر تأثیر مستقیم بر تولید بیوگاز می‌باشد.

این تغییرات در رطوبت، مخلوطی مناسب از مواد اولیه و آب برای بارگذاری فراهم کرد. با توجه به شکل ۵ نتایج نشان دادند که میزان pH در طول آزمایش کاهشی بوده و این امر به دلیل تولید بیشتر اسید و مصرف آن توسط متانوژن‌ها در روزهای ابتدایی و پس از شروع فرآیند هضم بوده است. با پیشرفت آزمایش تولید بیوگاز، میزان اسیدهای فرار در مخزن افزایش می‌یافت، که نیازمند مصرف این اسیدها توسط باکتری‌های متانزا بود. همچنین، دلیل دیگر کاهش pH، واکنش‌های بیولوژیکی مواد درون هاضم‌ها می‌باشد.

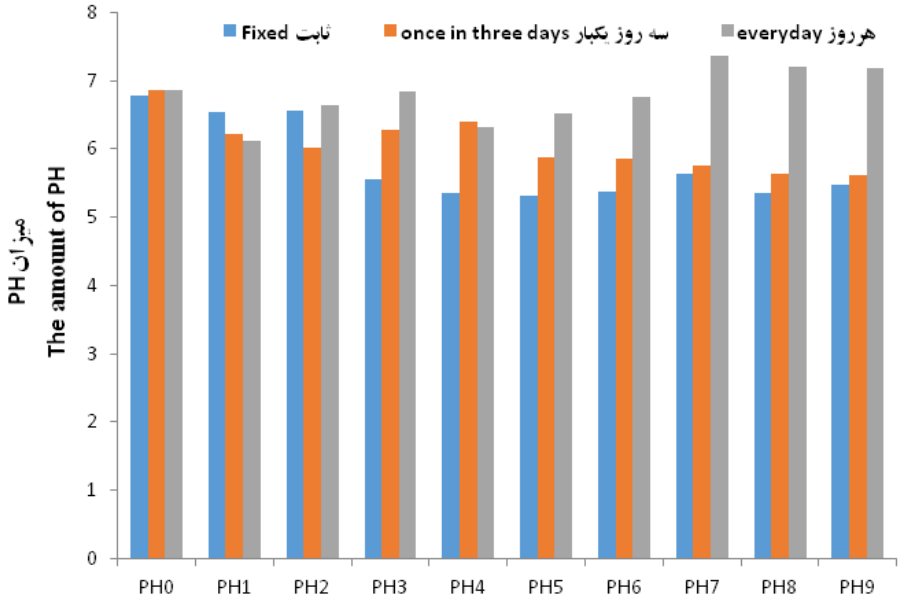
نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های لرزش هاضم‌ها بر میزان pH در جدول ۴ نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بین میزان لرزش با pH مواد در داخل هاضم وجود دارد. لذا عامل لرزش می‌تواند واکنش‌های اسیدی داخل هاضم را تغییر داده و در روند تجزیه مواد تأثیرگذار باشد. با توجه به جدول تجزیه واریانس عامل نوع هاضم اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد بر میزان گاز تولیدی داشته است. در این حالت امکان مصرف اسیدهای چرب فراهم گشته و فعالیت متانوژن‌ها در هاضم بیشتر شده و باعث بالا رفتن خاصیت اسیدی و pH می‌گردد.

همچنین نتایج آزمون دانکن برای بررسی و مقایسه میانگین اثر نوع هاضم بر میزان گاز تولید شده در جدول ۵ بیان شده است. با توجه به این نتایج اختلاف معنی‌داری بین سطوح هاضم‌ها وجود دارد. نتایج حاکی از تأثیر مستقیم مقدار لرزش بر میزان pH درون هاضم می‌باشد. بیشترین مقدار مربوط به هاضم با لرزش هر روز بوده و تغییرات در این هاضم با pH= ۶/۷۸ دارای بالاترین مقدار می‌باشد و دلیل آن این است که لرزش سبب افزایش سرعت واکنش هضم می‌گردد. در نتیجه همانطور که در بالا اشاره شد امکان مصرف اسیدهای چرب بیشتر فراهم شده و فعالیت متانوژن‌ها در هاضم بیشتر شده و باعث بالاتر رفتن مقدار pH می‌گردد.



شکل(٤) تغییرات دمای محیط نمونه‌های مورد آزمایش

Figure(4) Ambient temperature changes of the tested samples



شکل(٥) تغییرات میزان میانگین pH در طول آزمایش

Figure(5) Changes in the average pH level during the experiment

جدول(٤) تجزیه واریانس اثر پارامتر لرزش هاضم ها بر میزان pH

Table(4) Variance analysis of the effect of digester shaking parameter on pH value

منابع تغییرات (Sources of changes) (SOV)	درجه آزادی (Degrees of freedom) (df)	مجموع مربعات (Sum of squares) (SS)	میانگین مربعات (Average of squares) (MS)	ارزش (Value) (F)
pH	2	1.58	0.79	100.41**
خطای آزمایش (Test error)	6	0.04	0.007	-
کل (Total)	8	1.62	-	-

** معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد (Significance at the 1% probability level)

جدول(٥) نتایج آزمون دانکن برای مقایسه میانگین اثر نوع هاضم بر میزان pH

Table(5) Duncan's test results to compare the average effect of the type of digester on the pH value

نوع هاضم (Type of digester)	میانگین میزان pH (Average amount)
ثابت (Fixed)	5.8c
لرزش سه روز یکبار (Shaking every three days)	6.01b
لرزش هر روز(Shake every day)	6.78a

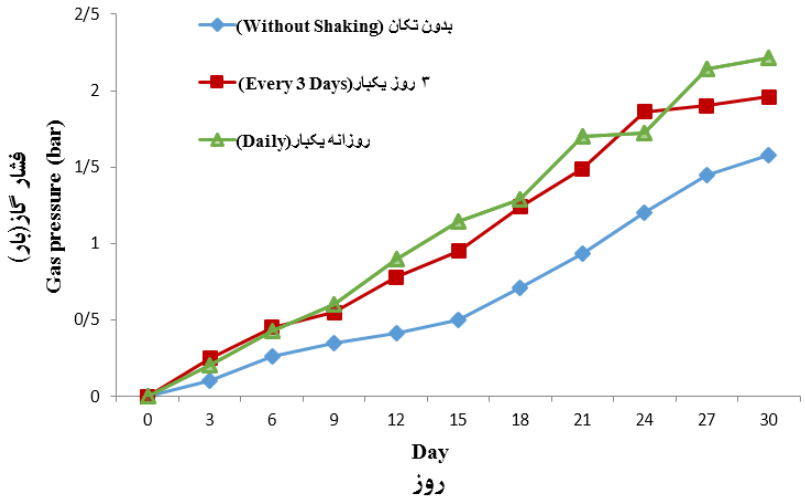
میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌داری با هم ندارند

(Averages with common letters do not have significant differences)

شکل ۶ اثر لرزش هاضم‌ها بر فشار گاز از پوست باقلا را نشان می دهد. زمان همزدن مواد در فرآیند تولید بیوگاز می‌تواند تأثیر مهمی داشته باشد و به شرایط خاص هر سیستم بستگی دارد. انتخاب زمان همزدن باید با توجه به نوع مواد، نوع سیستم، نوع میکروب‌ها، و شرایط فیزیکی-شیمیایی محیط انجام شود. تأثیر زمان همزدن در فرآیند تولید بیوگاز را می‌توان به این صورت بررسی کرد که همزدن مکرر می‌تواند باعث افزایش مخلوط‌سازی، کاهش زمان تخمیر و افزایش تولید گاز متان گردد و همزدن با فواصل طولانی (مثلاً ۳ روز یکبار) می تواند باعث کاهش مخلوط‌سازی و زمان تخمیر بیشتر شده و ممکن است به افت تولید بیوگاز منجر شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود، روند تغییر گاز به صورت افزایشی بوده و نشان‌دهنده تولید مستمر گاز در طول فرآیند هضم می‌باشد. در هاضم ثابت، در ابتدا روند تولید گاز تقریباً یکنواخت بوده و پس از دو هفته از شروع آزمایش، روند تولید گاز به صورت صعودی افزایش یافت و میزان گاز تولید شده قابل توجه بود. در هاضم با لرزش سه روز یک بار و لرزش هر روز، روند تولید گاز به صورت افزایشی بود. در انتهای فرآیند هضم در هاضم با لرزش سه روز یک بار، به دلیل تغییرات در pH، تغییرات در این دوره تقریباً نامحسوس بوده ولی در نهایت دوباره به روند صعودی بازگشت. این نتایج نشان می‌دهند که تغییر و تولید گاز برای زمان ماند تعیین شده ادامه دارد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیر مستقیم تکان دادن بر فرآیند تولید گاز می‌باشند.

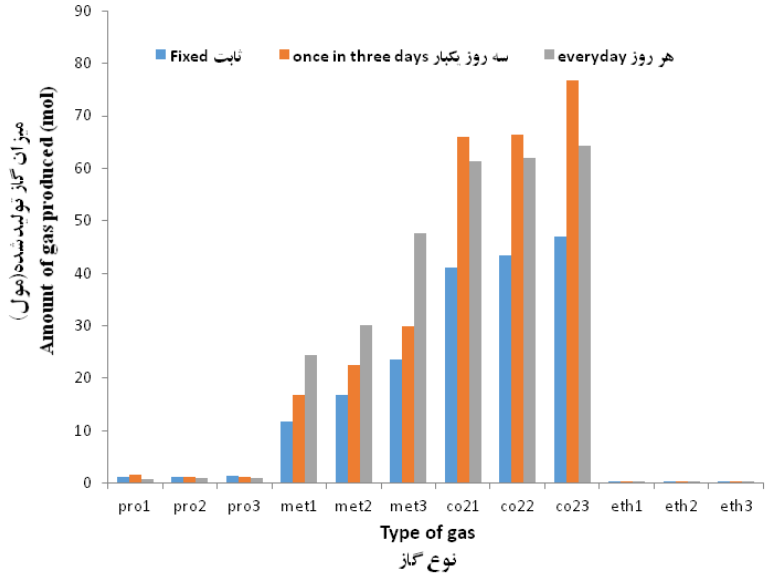
در شکل ۷ میانگین مقادیر گازهای تولید شده در طول فرآیند هضم بی‌هوازی و همچنین اجزاء آن نمایش داده شده است. در طول فرآیند، طی سه دوره ده روزه، مقادیر گاز تولید شده توسط کیسه‌های متصل به هاضم‌ها جهت

بررسی میزان و اجزاء بیوگاز تولیدی به آزمایشگاه منتقل شدند و داده‌ها ثبت شدند. اجزاء گازهای تولید شده شامل گازهای پروپان، متان، دی‌اکسید کربن و اتان بود. در برخی از هاضم‌ها، مقادیری از گاز نیتروژن و ایزو-بوتان و نرمان-بوتان نیز با درصد بسیار ضعیف مشاهده شدند. همانطور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، روند تولید در طی فرآیند صعودی بوده و بیشترین مقدار گاز تولید شده به ترتیب به دی‌اکسید کربن و متان تعلق دارد. بیشترین مقدار تولید گاز به ترتیب در هاضم با لرزش هر روز، هاضم با لرزش سه روز یک بار و هاضم ثابت ثبت شد.



شکل(٦) میانگین تغییرات فشار گاز تولید شده بطور روزانه

Figure(6) depicts the daily average changes in gas pressure produced



شکل(۷) میانگین میزان گاز های تولید شده پروپان، متان، دی اکسیدکربن و اتانول

Figure(7) Average levels of produced gases including propane, methane, carbon dioxide, and ethanol

.

شکل ۸ نمایش تغییرات گاز در طی دوره‌های ده روزه را گزارش می‌دهد. میانگین تغییرات نشان می‌دهد که با گذشت زمان، میزان تولید گاز افزایش یافته و در هر سه نوع هاضم، روند افزایشی دارد. میزان تغییرات در گاز متان نسبت به سایر گازها منظم‌تر بوده و بیشترین مقدار متان تولید شده مربوط به هاضم با لرزش هر روز و در دوره سوم آزمایشات است. مقادیر بالای دی‌اکسید کربن در نتایج نشان دهنده فعالیت فرآیند هضم در مرحله استات‌زایی و متان‌زایی می‌باشد که به برقراری تعادل بین متابولیسم جمعیت‌های میکروبی وابسته است. میانگین تولید متان در این فرآیند در هاضم با لرزش هر روز ۳۴/۰۶ مول، هاضم با لرزش سه روز یک بار ۲۳/۰۹ مول و هاضم ثابت ۱۷/۳۲ مول بوده است.

نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های لرزش هاضم‌ها (تحت لرزش یا ثابت) بر میزان تولید بیوگاز در جدول ۶ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری در میزان تولید بیوگاز در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد. به عبارت دیگر، نوع هاضم تأثیر معنی‌داری بر ترکیب مواد داخلی هاضم و در نتیجه، سرعت واکنش‌های شیمیایی داخلی دارد. به عبارت ساده‌تر، تکان دادن هاضم‌ها سبب می‌شود که ترکیب مواد درون هاضم بهبود یابد و مواد بهبود یافته بهتر و به شکل مؤثرتری هضم شوند. عمل همزدن به دلیل اثرات مختلفی که بر محتویات هاضم در فرآیند تولید بیوگاز دارد، می‌تواند به بهبود هضم مواد و افزایش تولید بیوگاز کمک کند. این اثرات شامل موارد زیر می باشد:

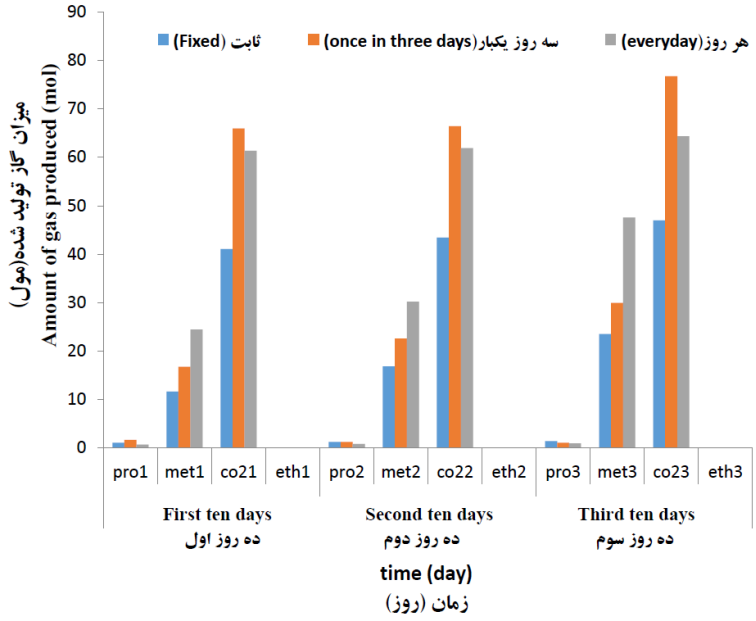
۱- افزایش مخلوط‌سازی: همزدن باعث تراکم و مخلوط‌سازی بهتر مواد در فرآیند می‌شود. این امر باعث توزیع یکنواخت مواد و ایجاد شرایط محیطی یکسان برای میکروب‌های تخمیری می‌شود.

۲- تسهیل در فعالیت میکروب‌ها: همزدن باعث تخلیه آسان‌تر آکارها و گازهای تولید شده از محیط می‌شود. این امر میکروب‌ها را در تماس با مواد غذایی قرار می‌دهد و به آنها اجازه می‌دهد به طور مؤثرتر مواد را تجزیه و هضم کنند.

۳- کاهش زمان تخمیر: همزدن می‌تواند زمان تخمیر را کاهش دهد. این امر به معنای افزایش سرعت فعالیت میکروب‌ها و افزایش نرخ تولید گاز متان است.

۴- کاهش احتمال انبساط یا تجمع مواد: با همزدن مواد، احتمال انبساط و یا تجمع مواد در نقاط خاص کمتر می‌شود. این امر به پیشگیری از ایجاد مناطق بی‌فعال و کاهش احتمال مشکلات مرتبط با تراکم مواد کمک می‌کند.

همچنین از نتایج آزمون دانکن برای مقایسه میانگین اثر نوع هاضم بر میزان گاز تولید شده طبق جدول ۷ مشاهده می شود که نوع هاضم در سطح احتمال ۱ درصد اثر معنی‌داری بر میزان تولید گاز داشته و تفاوت‌های معنی‌داری در میزان تولید گاز بین هاضم‌های مختلف وجود دارد. نتایج نشان می‌دهند که هاضم با لرزش هر روز بیشترین میزان تولید گاز متان را داشته و این میزان بیشتر از هاضم با لرزش سه روز یک بار و هاضم ثابت است.



شکل(۸) میانگین میزان گاز تولید شده طی سه دوره ده روزه

Figure(8) average amount of gas produced during three periods of ten days

جدول(٦) تجزیه واریانس اثر پارامتر لرزش هاضم‌ها بر میزان بیوگاز تولید شده

Table(6) Variance analysis of the effect of the vibration parameter of digesters on the amount of biogas produced

منابع تغییرات (Sources of changes) (SOV)	درجه آزادی (Degrees of freedom) (df)	مجموع مربعات (Sum of squares) (SS)	میانگین مربعات (Average of squares) (MS)	ارزش (Value) (F)
فشار (Pressure)	2	0.45	0.22	11.35**
خطای آزمایش (Test error)	6	0.12	0.02	-
کل (Total)	8	0.57	-	-

** معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد (Significance at the 1% probability level)

جدول(۷) نتایج آزمون دانکن برای مقایسه میانگین اثر نوع هاضم بر میزان گاز تولید شده

Table(7) The results of Duncan's test to compare the average effect of digester type on the amount of gas produced

نوع هاضم (Type of digester)	میانگین میزان فشار (Average pressure)
ثابت (Fixed)	0.84^{b}
لرزش سه روز یکبار (Shaking every three days)	1.26^{a}
لرزش هر روز (Shake every day)	1.367^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌داری با هم ندارند

(Averages with common letters do not have significant differences)

نتیجه‌گیری

مصرف جهانی انرژی در سال‌های اخیر به دلیل رشد جمعیت و توسعه صنعت به شدت افزایش یافته است. همین امر باعث شده تا توجه دنیا به سمت منابع انرژی‌های تجدیدپذیر معطوف گردد. یکی از این منابع انرژی تجدیدپذیر، بیوگاز می باشد که تحت تجزیه‌ی بی‌هوازی مواد قابل تجزیه (زیست‌توده) از قبیل فضولات کشاورزی، فاضلاب، زباله‌های شهرداری، زباله‌های سبز (باغ‌ها و پارکها)، مواد گیاهی و محصولات کشاورزی تولید می‌شود. بر آن اساس در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر لرزش هاضم بر میزان تولید بیوگاز و اجزاء تشکیل‌دهنده آن از پوست باقلا پرداخته شد. نتایج حاکی از تأثیر مستقیم مقدار لرزش بر میزان PH درون هاضم داشت. بیشترین مقدار مربوط به هاضم با لرزش هر روز بوده و تغییرات در این هاضم با ۶/۷۸ دارای بالاترین مقدار بود. همچنین، لرزش هاضم‌ها تأثیر معنی‌داری بر میزان تولید بیوگاز داشته و تاثیرات ساختاری درون هاضم را بهبود بخشید. اما تکرار زیاد لرزش در مقدار تولید بیوگاز تأثیر معنی‌داری نداشت. میانگین میزان تولید متان در این فرآیند در هاضم‌های با لرزش هر روز ۳۴/۰۶ درصد مول، هاضم‌های با لرزش سه روز یکبار ۲۳/۰۹ درصد مول و هاضم‌های ثابت ۱۷/۳۲ درصد مول بود که در نهایت نتایج بیانگر آن است که پوست باقلا به عنوان یک زیست توده دارای پتانسیل مناسب جهت تبدیل به بیوگاز بوده و عوامل محیطی و نوع هاضم تأثیر زیادی بر تولید گازهای بیوگازی از پوست باقلا داشته و می‌توانند در طراحی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید بیوگاز و مدیریت مواد آلی در تولید انرژی استفاده شوند.

References

1- Amoo, A. O., Ahmed, S., and Haruna, A. 2023. The Impact of Process Variables on the Quantity and Quality of Biogas Generated from Anaerobic Digestion of Food Waste and Rumen Contents. Industrial and Domestic Waste Management, 3(1): 27-37.

2- Basumatary, S., Das, S., Goswami, P., and Kalita, P. 2023. Investigation of the effect of slurry mixing ratio and temperature on biogas production from cattle dung in a field-scale anaerobic digestion plant. International Journal of Ambient Energy, 45(1).

3- Guerini, M.F., Lumi, M., and Hasan, C. 2018. Munique Marder Energy recovery from wine sector wastes: A study about the biogas generation potential in a vineyard from Rio Grande do Sul, Brazil. ustainable Energy Technologies and Assessments, 29: 44-49.

4- Hashemi, S., Karimi, K., and Sabzealian, M. 2017. Improvement of Biogas and Ethanol Production from Safflower Straw Using Sodium Hydroxide Pretreatment. Biological Journal of Microorganism, 6(22): 27-43. (In Persian with English abstract)

5- Kabeyi, M. J. B., and Olanrewaju, O. A. 2022. Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. Journal of Energy, 2022: 1-43.

6- Karami Bojani, S., Yeganeh, R., Khairalipour, K., and Ebrahimi, H. 2014. Investigating the effect of the type of raw material and reactor on the amount and constituents of biogas. Master's thesis, Ilam University. (In Persian with English abstract)

7- Lattieff, F.A. 2016. A study of biogas production from date palm fruit wastes. Journal of Cleaner Production, 139:1191-1195.

8- Mahmoudi, M., Ebrahimi, R., and Ghasemi, A. 2017. Qualitative and quantitative analysis of biogas generated from co-digestion of cow dung, municipal sewage and kitchen waste. Journal of Agricultural machinery, 7(1): 192-203. (In Persian with English abstract)

9- Malekzadeh, M.J., Kiani Dehkiani, M., and Sajadiyeh, S. M. 2020. The effect of temperature and cow manure on biogas production from sugarcane bagasse. Journal of Agricultural Engineering, 42(4): 107-117. (In Persian with English abstract)

10- Mancini, M., Papirio, S., and Lens, N. L. 2018. Increased biogas production from wheat straw by chemical pretreatments. Renewable Energy, 119: 608-614.

11- Moghadam, A. M., Aghkhani, H., Aghel, M., and Abaspoor. H. 2013. Production of biomethane from anaerobic digestion of waste potatoes combined cattle manure by batch daigester. The second conference of clean energy, Kerman, Iran. (In Persian)

12- Nauman, M., Tayyab, M., Faheem, M., Ikram, K., Akram, M. W., Asif, M., and Omar, M. M. 2023. Designing and performance evaluation of continuously stirring anaerobic batch reactor for biomethane production from biowaste. Biomass Conversion and Biorefinery. Doi: 10.1007/s13399-023-04203-y.

13- Purdy, A., Pathare, B., Wang, Y., and Huang, Y. 2018. Towards sustainable farming: Feasibility study into energy recovery from bio-waste on a small-scale dairy farm. Journal of Cleaner Production, 174: 899-904.

14- Safari, M., and Abdi, R. 2016. Comparison of biogas production from rapeseed and wheat residues in compound with cattle manure. Journal of Agricultural Machinery, 6(2):476-487. (In Persian with English abstract)

.

15- Salehi, K., Khazraei, M., Hosseini, F., and Mostafazadeh, F. K. 2013. Biogas production from kitchen waste and sheep manure in laboratory scale. Journal of Environmental science and technology, 16(1): 463-470. Special issue 93. (In Persian with English abstract)

16- Tadibani, A., Kiani, M., Karimi, K., and Soleimani, M. 2019. Effect of temperature and pre-processing method on biogas production from sugarcane bagasse. Master's thesis. Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian with English abstract)

17- Tasnim, F., Iqbal, S.A., and Chowdhury, A. R. 2017. Biogas production from anaerobic co-digestion of cow manure with kitchen waste and Water Hyacinth. Renewable Energy, 109:434-439.

18- Terboven, C., Ram, P., and Herrmann, C. 2017. Demand-driven biogas production from sugar beet silage in a novel fixed bed disc reactor under mesophilic and thermophilic conditions. Bioresource Technology, 241: 582-592.

19- Wang, F., Zhang, D., Wu, H., Yi, W., Fu, P., Li, Y., and Li, Z. 2016. Enhancing biogas production of corn stover by fast pyrolysis pretreatment. Bioresource Technology, 218:731-736.