

Research Article

Agricultural Engineering., 47(2) (2024) 143-160

ISSN (E): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2024.46033.1712

ISSN (P): 2588-5944

Evaluation of anaerobic digestion of municipal waste and biogas production efficiency in combination with animal waste

D. Mohammadzamani^{1*}, M. Jafari² and M. Raoli³

1. Associate Professor, Department of Agricultural Mechanization, Islamic Azad University, Takestan Branch, Takestan, Iran
2. Assistant Professor, Department of Electronics, Islamic Azad University, Takestan Branch, Takestan, Iran
3. Assistant Professor, Department of breeding, Islamic Azad University, Takestan Branch, Takestan, Iran

Received: 9 February 2024 Accepted: 17 May 2024 *Corresponding Author: dr.dmzamani@gmail.com

Abstract

Introduction: The yield of methane production in the anaerobic digestion processes of municipal organic solid waste alone is low. Adding animal waste or other additives to municipal solid waste as feed for anaerobic digestion system not only increases the relative composition of methane, but also increases the rate of biogas production (Rivas-García, 2020). Carbon and nitrogen are essential elements for the growth and reproduction of aerobic microorganisms. The balanced ratio for C/N in the process is between 20-30. Simultaneous digestion is used to balance the C/N ratio (Yousefi & Bahri, 2021). This process has many advantages, including the synergistic effect of microorganisms, increasing the stability of the process, increasing the efficiency of biogas, increasing the recycling of nutrients and reducing odor.

Materials and Methods: This research was carried out with the aim of increasing the rate of biogas production, reducing the feed retention time in the digester and increasing the amount of biogas production, by investigating the effect of co-digestion of urban solid organic waste with cow excrement using anaerobic digestion method. For this purpose, 52 samples of mixed urban waste (during the year 1400, once a week and one sample each time) were prepared from the waste transfer station of Qazvin city, and in order to investigate the effect of animal manure on the studied variables, from a cattle farm located in 50 kg of fresh manure was collected in the region. After preparing the samples, a laboratory bioreactor was used to perform the experiments. The biogas production process was carried out in two stages. In the first stage, urban waste materials were used, and in the second stage, a combination of urban waste materials and animal manure was used.

Results and Discussion: The ratio of carbon to nitrogen (C/N) in the primary feed and residual materials was obtained in the first and second stages. In this way, this ratio was estimated 19.39 and 27.64 for the primary feed and the remaining materials in the first stage and 18.60 and 28.23 respectively for the second stage.



In this study, the amount of ash decreased during the process, which indicated the participation of this substance in improving the activity of microorganisms. In both stages of the experiments, the organic matter of the primary feed decreased during the digestion process, which indicates the decomposition of these materials during the process. Also, the conversion percentage of dry material from primary feed to secondary material in stage 1 and 2 was 8.2% and 10.5%, respectively, which shows that in the second stage, in which the combination of animal manure was used, the percentage of conversion is more and the process has progressed towards the production of biogas.

The changes in the pressure of biogas inside the tank in the experiment related to stage 1 reached its maximum value (0.19 bar/kg) within 23 days after the start of the process, and then stabilized at 0.14 bar/kg of solid material in the last seven days. Since the criterion for the completion of the digestion process was pressure stabilization in seven consecutive days, therefore, after 38 days, the first stage process was completed and the biogas and residual (secondary) materials were discharged. The maximum biogas pressure in the second stage test was 0.28 bar/kg of solid material, which was achieved on the 15th day, and finally, after 26 days, the pressure reached 0.16 and stabilized at this pressure for seven days. Therefore, the digestion process in the second stage lasted for 32 days. Therefore, it can be seen that by using animal manure in the primary feed and keeping other variables constant, the retention time has decreased by 6 days compared to the first stage.

The maximum amount of biogas produced in stage 1 was equal to 6.27 liters/kg of solid matter and in stage 2 it was equal to 10.3 liters/kg of solid matter. As can be seen, by using animal manure in combination with urban organic waste, the volume of biogas production has increased under the same conditions. Taking into account the cumulative amount of biogas production, it was found that in stage 1 and 2, 140.89 and 230 liters/kg of solid biogas were produced during the digestion period, respectively. Therefore, the efficiency of biogas production has increased by 38%. Although the total amount of biogas produced in both stages of the experiments compared to the theoretical values obtained in this study (at the rate of 370 liters/kg of solid matter) and also reported by other researchers (Salehoun, et.al, 2020 and Kozminesky, 1995) has been less.

Conclusion: According to the results of this study, it was found that in the second stage compared to the first stage, the role of the two elements carbon and nitrogen in the biogas production process became more effective and one should expect more biogas production in the process, because the increase in the conversion of organic matter and nitrogen is. The more effective decomposition of these materials by microorganisms has been achieved by adding animal manure to the primary feed.

According to the results obtained from this study, it can be concluded that in the process of biogas production, the combination of animal manure with urban organic waste, in addition to reducing the retention time, can help to increase the efficiency of biogas production, which in this study a 38% increase in biogas production was observed in the case of using a combination of animal manure with urban organic waste compared to using only urban organic waste. Although the role of other variables such as temperature, type and amount of stirring, type of initial preparation of materials in terms of size, humidity, pH, addition of yeast and bacteria, degree of impurity and toxicity of materials, ratio of carbon to nitrogen, type and size of reactor and other examined variables.

Keywords: *Anaerobic digestion, biogas, municipal waste, animal manure, retention time*

بررسی هضم بی‌هوازی ترکیب زباله‌های شهری با فضولات دامی و تعیین بازده تولید بیوگاز

داود محمدزمانی^{۱*}، مهدی جعفری^۲ و محمد رسولی^۳

۱- دانشیار، گروه مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران

۲- استادیار، گروه الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران

۳- استادیار، گروه اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸

کلمات کلیدی:

تجزیه بی‌هوازی،

بیوگاز،

زباله شهری،

کود دامی،

زمان ماند

چکیده

فرایند هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز مانند سایر واکنش‌های بیوشیمیایی تحت تاثیر عوامل فیزیکی و شیمیایی متنوعی است. این پژوهش با هدف افزایش نرخ تولید بیوگاز، کاهش زمان ماند خوراک در هاضم و افزایش میزان تولید بیوگاز، با بررسی تاثیر هضم مشترک پسماندهای آلی جامد شهری همراه با فضولات گاوی به روش هضم بی‌هوازی انجام شده است. به این منظور از پسماند مخلوط شهری تعداد ۵۲ نمونه (طی سال ۱۴۰۰، یک بار در هفته و هر بار یک نمونه) از ایستگاه انتقال زباله شهر قزوین تهیه گردید و به منظور بررسی اثر کود دامی بر متغیرهای مورد مطالعه، از یک گاوداری واقع در منطقه، به میزان ۵۰ کیلوگرم کود تازه جمع‌آوری شد. پس از آماده سازی نمونه‌ها، از یک بیورآکتور آزمایشگاهی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. فرآیند تولید بیوگاز در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول مواد زائد شهری و در مرحله دوم ترکیب مواد زائد شهری و کود دامی بکار برده شد. نتایج نشان داد که با بکارگیری کود دامی در خوراک اولیه و با ثابت در نظر گرفتن سایر متغیرها، مدت زمان ماند در مقایسه با مرحله اول به مدت ۶ روز کاهش یافته است. همچنین با در نظر گرفتن میزان تجمعی تولید بیوگاز مشخص شد که در مرحله ۱ و ۲ به ترتیب به میزان ۱۴۰/۸۹ و ۲۳۰ لیتر بر کیلوگرم ماده جامد، بیوگاز در طی دوره هضم تولید شده است. لذا بازده تولید بیوگاز به میزان ۳۸ درصد در حالت ترکیب زباله شهری و کود دامی به دست آمد.

* عهده دار مکاتبات

Email: dr.dmzamani@gmail.com

مقدمه

مواد زائد از جمله زیاله‌های زیستی به دلیل فعالیت‌های اجتناب‌ناپذیر انسان و دام به طور مداوم در حال تولید هستند. تا سال ۲۰۱۶، حدود ۱۳۰۰ تن زیاله جامد شهری سالانه در سراسر جهان تولید شده است (۱۴) و پیش‌بینی می‌شود که نرخ تولید زیاله جامد شهری افزایش یابد و تا سال ۲۰۲۵ به بیش از ۲۰۰۰ تن برسد که بیش از ۴۰ درصد آن زیستی خواهد بود (۱۹). از جمله عوامل مرتبط با این افزایش می‌توان به افزایش جمعیت، افزایش نرخ شهرنشینی، صنعتی شدن، رشد اقتصادی و تغییر عادات غذایی و الگوهای مصرف اشاره کرد (۱۰).

در ایران روزانه ۵۰ میلیون کیلوگرم پسماند تولید می‌شود که به طور میانگین دارای ۷۱ درصد وزنی مواد فسادپذیر است و انرژی معادل با ۵۷۵۳۵۰ بشکه نفت خام در روز را داراست. میانگین سالانه استخراج گاز از محل‌های دفن زیاله حدود ۷ مترمکعب از هر تن زیاله می‌باشد که در مقایسه با بازده نظری تولید بیوگاز بسیار کم است. استخراج گاز در این شرایط برای شهرهای بسیار بزرگ مقرون به صرفه خواهد بود. اما با بهره‌گیری از فرایند هضم بی‌هوازی^۱ زیاله‌های فسادپذیر، مجموع بیوگاز قابل تولید در کشور (با فرض ۶۰ درصد بازدهی فرایند) به ۱۶۴۵/۷ میلیون مترمکعب بیوگاز در سال خواهد رسید (۷). روش‌های مختلفی برای مدیریت و کاهش میزان رو به رشد زیاله‌های زیستی به کار گرفته شده است. این روش اگر به خوبی مدیریت نشود، باعث آلودگی هوا و متعاقب آن اثرات زیست محیطی و بهداشتی خواهد شد.

هضم بی‌هوازی (AD) یک فرآیند میکروبی است که زیست توده را در یک محیط آبی به انرژی تبدیل می‌کند. منابع زیست توده، حتی با محتوای کمتر از ۴۰ درصد ماده خشک، می‌توانند

در فرآیند AD استفاده شوند. مطالعات اخیر ظرفیت بالاتری را برای بهبود سامانه‌های AD در مقایسه با روش سوزاندن تایید می‌کند (۳).

هضم بی‌هوازی (AD)، که به طور گسترده برای تصفیه زیست توده استفاده می‌شود، به عنوان یکی از مطلوب‌ترین فرآیندها برای تولید سوخت زیستی از زیست توده در نظر گرفته می‌شود. فناوری-های AD را می‌توان بر اساس محتوای کل جامدات (TS) به سه کلاس اصلی طبقه بندی کرد: AD مرطوب با ماده خشک کمتر از ۱۵ درصد، AD خشک با ماده خشک کمتر از ۲۵ درصد و حالت جامد AD با محتوای ماده خشک تا ۴۰ درصد. در حال حاضر بیشتر از روش‌های هضم بی‌هوازی مرطوب و خشک استفاده می‌شود (۱۵). در طول فرآیند AD، ماده آلی توسط یک کنسرسیون میکروبی در یک محیط بدون اکسیژن تجزیه می‌شود. نتیجه اصلی فرآیند AD، تولید متان (۵۰-۷۵ درصد)، دی‌اکسید کربن (۱۹-۳۴ درصد) و بخش کوچکی از هیدروژن زیستی (کمتر از ۱ درصد) است. متان حاصل از AD می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی جایگزین برای سوخت‌های فسیلی استفاده شود. ظرفیت انرژی بسته به نوع ضایعات می‌تواند از ۲۰ تا ۳۰۰ کیلووات ساعت انرژی خالص در هر تن زیاله متفاوت باشد (۱۶). فرآیند زیستی AD بر اساس تبدیل بیوشیمیایی مواد آلی به متان است که از طریق عمل متابولیکی باکتری‌های متان‌زا و آرکیا^۲ رخ می‌دهد (۴). واکنش‌های متابولیکی در طی AD شامل چهار مرحله هیدرولیز، اسیدزایی، استات‌زایی^۳ و متان‌زایی^۴ است که توسط گروه‌های مختلف میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود. ترکیبات آلی پیچیده ابتدا از طریق واکنش‌های آنزیمی به

2- Archaea

3- Acetogenesis

4- Methanogenesis

بیوگاز کافی به دست نمی آید. برای بهبود هضم باقیمانده‌های کشاورزی، آنها را با کود دامی که دارای مقدار کربن زیادی است مخلوط می کنند تا تولید بیوگاز حاوی مقدار مناسب متان، تسهیل یابد و موجب افزایش قابلیت اشتعال پذیری بیوگاز شود. به عنوان مثال، هضم ترکیبی پسماند کاغذ با کود گاو منجر به تولید بیوگاز دارای مقدار و کیفیت بالاتر نسبت به زمانی که هضم آنها بصورت جداگانه انجام می شود، می گردد (۱۸). مناسب ترین نسبت ترکیب پسماندهای کشاورزی و کود دامی، نسبت یک به یک است (۲۸).

در پژوهشی تخمیر بی‌هوازی ضایعات مواد غذایی به همراه عناصر مکمل کمیاب (کبالت، آهن، نیکل و مولیبدن) مورد بررسی قرار گرفت. تخمیر بی‌هوازی ضایعات مواد غذایی به تنهایی دچار شکست شد ولی به همراه عناصر مکمل به مدت ۳۶۶ روز به طور مداوم صورت گرفت و بیشترین بازده متان (۳۵۲-۴۵۱ میلی لیتر بر گرم ماده خشک فرار) در طی ۲۱ تا ۳۱ روز از زمان ماند بدست آمد (۲۶). در یک مطالعه، هضم ترکیبی کود گاوی و زباله جامد آلی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در حالت ترکیبی، تولید بیوگاز بیشتر بوده و روند با ثبات تری دارد (۶). در مورد بررسی روند ترکیبی بودن ضایعات، آزمایش‌های هضم ترکیبی ضایعات غذایی و لجن هوازی از ضایعات صنعتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که هضم ترکیبی دو زباله می‌تواند مهار متان‌زا را کاهش و عملکرد تولید متان را افزایش دهد (۲۲). در پژوهشی بر روی تولید بیوگاز به وسیله کنجاله خردل و کود گاوی، نتایج نشان داد مخلوط ۳۱ درصد کنجاله خردل با کود، بیوگاز بیشتری نسبت به حالت انفرادی تولید خواهد کرد (۲۲).

مونومرهایی مانند گلوکز، اسیدهای آمینه و اسیدهای چرب با زنجیره بلند (LCFAs) هیدرولیز می شوند و متعاقباً در مسیر اسیدوژنیک به اسیدهای چرب فرار، H_2 و اسید استیک تبدیل می شوند. در طول مسیر متابولیک اکسیداسیون β ، LCFAs ها در مراحل مختلف به H_2 تجزیه می شوند. باکتری‌های استات‌زا اسیدهای چرب فرار را در مرحله استوژن به H_2 ، CO_2 و اسید استیک تبدیل می کنند. در Homoacetogenesis، هیدروژن برای کاهش دی-اکسید کربن به استات استفاده می شود. در نهایت، متان‌زها H_2 ، CO_2 و استات را به CH_4 و CO_2 تبدیل می کنند (۹).

فرایند هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز مانند سایر واکنش‌های بیوشیمیایی، تحت تاثیر عوامل فیزیکی و شیمیایی متنوعی است. عوامل مختلف مانند ماهیت سوبستره^۱ (مواد مغذی برای تغذیه آنزیم‌ها)، رطوبت، مواد جامد فرار، ساختار مواد مغذی، اندازه ذرات و زیست تخریب پذیری آنها، طراحی هاضم، تلفیح، قلیابیت، دما، نرخ بارگذاری، زمان ماند هیدرولیکی^۲ (مدت زمانی که میکروارگانیسم‌ها برای شکستن مواد آلی و تبدیل آن به فرآورده‌های زیست توده فرصت دارند) و مواردی از این قبیل، ثبات فرایند و تولید بیوگاز را تحت تاثیر قرار می دهند (۱۱).

فرآیند هضم مواد زائد مختلف زیست تخریب پذیر نشان داده است که ظرفیت تولید متان از طریق آزمایش‌های هضم ترکیبی نسبت به هضم انفرادی بالاتر است. اکثر پسماندهای کشاورزی دارای مواد مغذی زیادی (نیترژن زیاد) هستند در حالی که طبیعت لیگنوسلولوزیک^۳، آنها را به مقاومت در برابر حمله آنزیم میکروبی و می‌دارد. با وجود این واقعیت، در هضم بی‌هوازی این نوع سوبستره‌ها،

1- Substrate

2 -Hydraulic Retention Time (HRT)

3- Lignocellulosic

خوراک ورودی اشاره کرد (۵). دمای بالای این نوع هضم باعث می‌شود که فرایند و هاضم به کنترل و نگهداری بیشتری نیاز پیدا کند، به همین دلیل برای دماهای بالاتر از ۴۵ درجه سلسیوس پیشنهاد نمی‌شود. برای بهبود دمای تخمیر و جلوگیری از هدررفت آن، ساختمان واحدهای بیوگاز را با توجه به شرایط اقلیمی منطقه می‌سازند.

به طور معمول هاضم‌های تک‌مرحله‌ای به صورت گسترده برای تولید بیوگاز در گذشته مورد استفاده قرار می‌گرفت در حالی که استفاده از آنها شامل محدودیت‌هایی از جمله امکان بی‌ثباتی بیشتر به دلیل عوامل مختلف می‌باشد (۱۲). سامانه‌های دو مرحله‌ای پیوسته بیوگاز، با تضمین تولید مستمر بیوگاز و دوغاب، مورد استفاده برای اهداف تجاری و صنعتی هستند. سامانه هضم دو مرحله‌ای با تفکیک مراحل هیدرولیز-اسیدسازی و متان‌زایی برای هضم بی‌هوایی میوه‌ها و سبزیجات، ثبات بیشتر فرایند و افزایش تولید بیوگاز را نتیجه می‌دهد. مطالعات بیشتر نشان داده است که تفکیک اسیدسازی و هیدرولیز در هضم بی‌هوایی می‌تواند کاهش زمان ماند همراه با افزایش تولید بیوگاز و گاز متان را در پی داشته باشد. پژوهشی در جهت مقایسه این دو نوع هاضم صورت گرفته که نشان داده هاضم دو مرحله‌ای ۱۶/۵ درصد افزایش تولید انرژی نسبت به تک‌مرحله‌ای دارد (۱۲). در پژوهشی در تولید بیوگاز از بخش آلی زیباله‌های شهری، حجم بیوگاز تولیدی به مقدار ۳۷۲ میلی‌لیتر به ازای هر گرم ماده جامد فرار با غلظت ۲۰ درصد برای مواد جامد کل با درصد متان ۶۱/۸۲ درصد (معادل ۲۳۰ میلی‌لیتر) به دست آمد (۲۵).

بازده تولید متان در فرایندهای هضم بی‌هوایی پسماندهای جامد آلی شهری به تنهایی پایین است. ترکیب فضولات حیوانی و یا سایر افزودنی‌ها به پسماندهای جامد شهری به عنوان خوراک سامانه

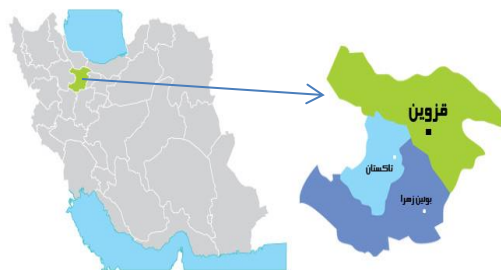
مواد خام را نمی‌توان به همان صورت وارد دستگاه بیوگاز کرد بلکه باید قبل از بارگیری، آنها را از نظر غلظت، قابلیت جذب باکتری، نسبت C/N، درجه حرارت و عدم وجود مواد سمی و عناصر بازدارنده مورد بررسی قرار داد (۲۳).

در تولید بیوگاز، سرعت واکنش تحت تاثیر دما قرار می‌گیرد. به علاوه دما بر روی قابلیت حل فلزات سنگین، دی‌اکسید کربن و در نتیجه بر روی ترکیب گاز اثر دارد. نوسانات دمایی بر رشد میکروبی تاثیر می‌گذارد و کاهش قابل ملاحظه‌ای در تولید بیوگاز را در پی دارد. دمای لازم برای انواع هضم بی‌هوایی به صورت زیر است (۲۱).
 هضم سایکروفیلی^۱: زمان ماند بیش از ۱۰۰ روز و دمای واکنش ۱۰ تا ۲۰ درجه سلسیوس؛ هضم مزوفیلی^۲: زمان ماند بین ۳۰ تا ۶۰ روز و دمای واکنش ۲۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس، هضم ترموفیل^۳: زمان ماند بین ۱۰ تا ۱۵ روز و دمای واکنش ۵۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس. واکنش‌های غیر هوایی در دستگاه‌های بیوگاز عموماً در دمای ۱۰ الی ۶۰ درجه سلسیوس صورت می‌گیرد. باکتری‌های فعال در حرارت ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس به مزوفیلیک و آنهایی که در ۴۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس فعالیت حیاتی دارند به باکتری‌های ترموفیلیک شهرت دارند. هضم ترموفیلیک، سرعت خروج گاز متان و تولید آن را بهبود می‌بخشد، لذا زمان ماند کمتری نیاز دارد. همچنین این نوع هضم به دلیل دمای بالا موجب از بین رفتن عوامل بیماری‌زا^۴ شده (۲۷) و برای سامانه‌هایی با درصد جامدات بالا، نسبت به هضم مزوفیلیک بهتر عمل می‌کند. این نوع هضم در کنار مزایا، مشکلاتی هم دارد که می‌توان به پایداری کمتر و حساسیت بیشتری نسبت به

-
- 1- Psychrophilic
 - 2- Mesophilic
 - 3- Thermophilic
 - 4- Pathogen

جمعیت شهر قزوین در سال ۱۴۰۰ معادل ۶۲۱۸۰۰ نفر بوده که ۳۱۲۵۱۱ نفر مرد و ۳۰۹۲۸۹ نفر زن می‌باشند. جمعیت این شهر به سرعت در حال افزایش می‌باشد به طوری که جمعیت از ۸۸۰۰۰ نفر در سال ۱۳۴۵ به بیش از ۶۲۰۰۰۰ نفر در سال ۱۴۰۰ رسیده است. هر فرد در شهر قزوین روزانه ۸۰۰ گرم زباله تولید می‌کند که این آمار دو برابر استاندارد جهانی است. با توجه به سرانه تولید زباله توسط مردم شهر قزوین، روزانه حدود ۴۹۶ تن زباله خانگی در این شهر تولید می‌شود.

مدیریت پسماندهای شهری در قزوین بر عهده سازمان مدیریت پسماند شهرداری قزوین می‌باشد. سایت مدیریت پسماند محمدآباد مهمترین مرکز جمع‌آوری و مدیریت پسماند شهر قزوین می‌باشد. این سایت با ظرفیت ۲۰۰۰ تن در سال ۱۳۹۱ احداث شده است. هم‌اکنون در خطوط پردازش این سایت، زباله‌ها به صورت مستقیم وارد لندفیل می‌شود درحالی‌که در ابتدا مقرر بود زباله‌ها تفکیک و پردازش شوند اما این فرایند انجام نشده و با گذشت زمان مشکلات متعددی به وجود آمد و هم‌اکنون لندفیل پر شده است.



شکل (۱) موقعیت شهر قزوین

Figure(1) Location of Qazvin city

هضم بی‌هوازی نه تنها موجب افزایش ترکیب نسبی متان می‌شود بلکه نرخ تولید بیوگاز را نیز افزایش می‌دهد (۲۰). دو ماده کربن و نیتروژن عناصر ضروری برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌های هوازی است. نسبت متعادل برای C/N در فرایند بین ۲۰-۳۰ است. هضم همزمان برای تعادل نسبت C/N استفاده می‌شود (۲۹). در پژوهشی به تولید بیوگاز با استفاده از فضولات شتر و پسماند گیاه پالایی در مناطق حاشیه کویر پرداخته شد. نتایج این بررسی نشان داد که میزان pH نقش مهمی در تولید بیوگاز ایفا می‌کند. بارگزاری اول به دلیل خوراک ورودی کم و همچنین نرسیدن به زمان مورد نظر جهت انجام عملیات هضم، میزان pH هاضم کاهش یافته و در نتیجه تولید گاز بسیار اندک بود که به تدریج با افزایش تعداد بارگزاری، سرعت تولید گاز و مقدار تولید گاز افزایش پیدا کرد. همچنین مشخص شد با افزایش میزان پسماند گیاه پالایی میزان تولید بیوگاز کاهش می‌یابد (۳۰).

در این پژوهش سعی شده است با هدف افزایش نرخ تولید بیوگاز، کاهش زمان ماند خوراک در هاضم یا به عبارتی کاهش طول دوره هضم بی-هوازی و افزایش میزان تولید بیوگاز، تاثیر هضم مشترک پسماندهای آلی جامد شهری همراه با فضولات گاوی به روش هضم بی‌هوازی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جمعیتی و میزان تولید زباله خانگی شهر قزوین

مجموعه شهری قزوین شامل شهر قزوین و شهرها، شهرک‌ها و نواحی شهری اطراف آن است که جمعیتی در حدود ۷۵۰-۸۰۰ هزار نفر را در خود جای داده است. وسعت این مجموعه ۱۴۲۳ کیلومتر مربع است. شکل ۱ موقعیت شهر قزوین در ایران را نشان می‌دهد.

دمای ۷۷۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت مشخص شد. برای محاسبه ارزش حرارتی زیباله وزن خشک هر جزء زیباله در محتوی انرژی آن ضرب شد (۱۳).

به منظور بررسی اثر کود دامی بر متغیرهای مورد مطالعه، از یک گاوداری واقع در منطقه، به میزان ۵۰ کیلوگرم کود تازه جمع‌آوری و سپس برای بررسی ترکیبات معدنی و متغیرهای شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شد. جدول ۱ نتیجه بررسی آزمایشی یک نمونه یک کیلوگرمی را نمایش می‌دهد.

نتایج آنالیز مواد زائد شهری

ترکیب مواد زائد در جدول ۲ و درصد اجزاء شیمیایی مواد زائد در جدول ۳ ارائه شده است. از داده‌های جدول ۲ در محاسبات مربوط به موازنه جرم و استوکیومتری تولید بیوگاز در حالت نظری و از داده‌های جدول ۳ برای محاسبه نسبت کربن به ازت استفاده شد.

روش نمونه‌برداری و بررسی آزمایشگاهی نمونه‌ها

در این پژوهش از پسماند مخلوط شهری تعداد ۵۲ نمونه (طی سال ۱۴۰۰، یک بار در هفته و هر بار یک نمونه) و هر نمونه به جرم یک کیلوگرم تهیه گردید. هدف از نمونه‌برداری در طی سال، به دست آوردن یک میانگین از نظر درصد ترکیبات زیباله شهری در طی مطالعه بوده است. همه نمونه‌برداری‌ها از ایستگاه انتقال زیباله شهر قزوین انجام شد. علت انتخاب ایستگاه انتقال به عنوان محل نمونه‌برداری این بود که تمام پسماندهای شهری به این ایستگاه انتقال داده می‌شود. همچنین در این محل منطقه مسقفی وجود دارد که از تاثیر شرایط اقلیمی مانند بارندگی بر روی نمونه‌ها جلوگیری می‌کند. نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D92-5231 انجام گرفت (۸). بر اساس این روش همه اجزای زیباله پس از توزین توسط ترازوی دیجیتال به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون قرار داده شد. محتوای خاکستر نیز پس از قرار گرفتن در

جدول (۱) ترکیب مواد معدنی و برخی مشخصه‌های شیمیایی نمونه کود گاوی مورد استفاده در پژوهش
Table (1) The composition of minerals and some chemical characteristics of the cow manure sample used in the research

مقدار Value	واحد Unit	متغیر Variable
2.32	درصد %	ازت N
0.73	درصد %	فسفر phosphorus
1.97	درصد %	پتاس potash
82.14	درصد %	ماده آلی organic matter
21.12	درصد %	ماده خشک dry matter
19.14	دسی زمینس بر متر Ds.m ⁻¹	EC
7.6	-	PH

جدول (۲) ترکیب مواد زائد شهری قزوین سال ۱۴۰۰

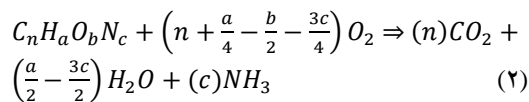
Table 2- The composition of Qazvin urban waste materials in 2021

محتوای انرژی MJ.kg ⁻¹ energy content, MJ.kg ⁻¹	درصد مواد قابل احتراق Percentage of combustible materials	درصد خاکستر Percentage of ash	درصد رطوبت Percentage of moisture	درصد اجزاء Percentage of components	ترکیب Composition
1.8	17	11.1	44.3	63.7	پسماند آلی Organic waste
2.1	6	0.45	0.51	6.4	کاغذ و مقوا Paper and cardboard
2.1	5.5	0.12	0.11	6.9	پلاستیک Plastic
1.3	4	0.68	0.37	3.5	منسوجات Textiles
1.4	2.7	0.98	0.09	2.2	لاستیک rubber
0.9	2.1	4.1	0.1	1.3	چرم leather
0.6	2.7	4.8	2.4	2.4	چوب Wood
0.004	0	0.9	0.07	2.1	شیشه Glass
0.008	0	2.11	0.09	1.6	فلزات آهنی Ferrous metals
0.07	0	1.9	0.09	1.9	فلزات غیر آهنی Non-ferrous metals
0.7	2	11.2	2.5	8	غیره etc
10.98	42	38.34	50.63	100	جمع Total

زمانی و همکاران: بررسی هضم بی‌هوازی ترکیب زیباله‌های...

جدول (۳) درصد اجزاء شیمیایی مواد زائد

S	N	O	H	C	اجزا Components
9.95	2.02	37.55	1.95	39.18	پسماند آلی organic waste کاغذ و مقوا
0.2	0.25	44.32	5.82	43.41	Paper and cardboard
0	0	22.8	7.2	60	پلاستیک Plastic
0.2	2.18	41.85	6.41	46.19	منسوجات Textiles
2	0	0	10.35	77.65	لاستیک Rubber
0.2	2.18	41.85	6.1	49.7	چوب Wood
0	0.03	0.36	0.07	0.52	شیشه Glass
0.01	0.05	4.3	0.6	4.54	فلزات Metals



که در آن c بیانگر تعداد اتم‌های نیتروژن است. از این معادلات برای برآورد میزان تولید بیوگاز و نیز حجم گاز متان

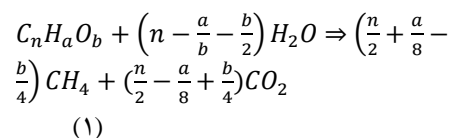
تولید شده در فرآیند تجزیه بی‌هوازی در حالت نظری استفاده شد.

فرآیند تولید بیوگاز در شرایط آزمایشگاهی

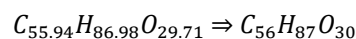
به منظور بررسی نوع و میزان مواد اولیه (خوراک) بر متغیرهای مورد مطالعه در پژوهش (افزایش نرخ تولید بیوگاز، کاهش زمان ماند خوراک در هاضم یا به عبارتی کاهش طول دوره هضم بی‌هوازی و افزایش میزان تولید بیوگاز) از یک بیورآکتور آزمایشگاهی استفاده شد. تصویر این بیورآکتور در شکل ۲ نمایش داده شده است.

موازنه جرم و استوکیومتریک برای محاسبه میزان تولید بیوگاز در حالت نظری

اگر اجزاء آلی خاص موجود در پسماند شهری (به استثنای پلاستیک) به صورت فرمول کلی $C_n H_a O_b$ در نظر گرفته شوند، کل حجم گاز تولیدی با فرض تبدیل زیستی کامل پسماند آلی به CH_4 و CO_2 را می‌توان با استفاده از معادله ۱ بدست آورد (۲۴):



که در آن a، b و n به ترتیب بیانگر تعدادی اتم‌های هیدروژن، اکسیژن و کربن هستند. با استفاده از معادله ۱ و مشخصات فیزیکی و شیمیایی درج شده در جدول ۱ و ۳ رابطه شیمیایی زیر به دست آمد:



همچنین میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی^۱ (COD) از معادله ۲ قابل محاسبه است:

و دمای داخل هاضم به طور مرتب اندازه‌گیری و یادداشت شد. مبدل فشار از نوع UNIK 5000، با دقت ۰/۰۴ درصد تولید شده توسط شرکت GE در کشور آمریکا بود. اندازه‌گیری دما از طریق یک ترموکوپل تعبیه شده داخل مخزن با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس انجام شد. ملاک پایان زمان هضم ثابت ماندن فشارنسبی داخل هاضم برای حدود یک هفته لحاظ گردید (۲۹). نوع تغذیه راکتور به صورت یکجا بود. به منظور اینکه باکتری‌ها بتوانند مواد آلی را جذب کنند، لازم است که مواد به صورت محلول درآیند زیرا آب یکی از عناصر اصلی جهت تغذیه میکروارگانیسم‌ها است که موجب حرکت باکتری‌ها، فعالیت آنزیم‌های سلولی، هیدراسیون بیوپلیمرها و همچنین تسهیل شکست سلول‌ها می‌شود. بدین منظور از ۱۰ لیتر آب برای رقیق‌سازی مخلوط استفاده شد.

در مرحله دوم، خوراکی متشکل از مخلوطی از پسماند جامد آلی خانگی جمع‌آوری شده و خرد شده به میزان ۱۲ کیلوگرم به علاوه ۳ کیلوگرم فضولات گاوی با ۱۰ لیتر آب انتخاب شد. میزان دما و سرعت دورانی همزن مشابه مرحله اول در نظر گرفته شد. مدت زمان تولید گاز ۳۲ روز به طول انجامید. تمامی مراحل آزمایش مطابق دو مرحله قبل تکرار شد.

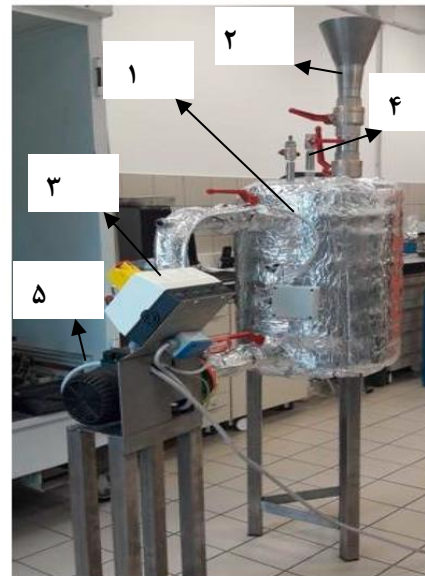
به منظور محاسبه حجم روزانه بیوگاز تولید شده در فرآیند هضم، از رابطه مربوط به قانون گازها (رابطه ۳) که به عنوان قانون ترکیبی گازها نیز معروف است استفاده شد:

$$\frac{P.V}{T} = Constant \quad (3)$$

حال با تعمیم رابطه فوق برای گاز داخل مخزن هاضم می‌توان رابطه (۴) را به دست آورد:

$$\frac{P_2.V_2}{T_2} = \frac{P_1.V_1}{T_1} \quad (4)$$

که در آن V حجم گاز در دمای T و فشار P است. برای محاسبه حجم بیوگاز تولید شده در بیوراکتور و به طور روزانه از رابطه ۴ با اندازه‌گیری روزانه دما و فشار گاز داخل مخزن استفاده شد. دمای معمول کارکرد بیوراکتور (T_1) به میزان ۲۰ درجه سلسیوس (۷۹/۱ درجه کلونین) و فشار حالت عادی بیوراکتور (P_1) معادل ۱ بار در نظر گرفته شد.



شکل (۲) بیوراکتور مورد استفاده در پژوهش (۱: مخزن هاضم، ۲: محل بارگذاری مواد اولیه، ۳: تابلوی کنترل، ۴: شیر گاز خروجی، ۵: موتور الکتریکی همزن)
Figure (2) The bioreactor used in the research (1: digester tank, 2: raw material loading, 3: control panel, 4: outlet gas valve, 4: electric motor of agitator)

فرآیند تولید بیوگاز در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول به میزان ۱۲ کیلوگرم از زباله شهری که فقط شامل ماده آلی که سایر ناخاصی‌های آن جدا شده بود و بیانگر متوسط اجزاء مواد زائد آلی زباله شهری بود، توسط دستگاه آسیاب خرد شد به گونه‌ای که اندازه متوسط ذرات حدود ۵ میلی‌متر باشد. سپس نمونه داخل مخزن هاضم قرار گرفت. شرایط دمایی در طی فرآیند به حالت مزوفیلیک تنظیم شد. برای ایجاد شرایط مزوفیلیک، محتویات داخل مخزن به وسیله پوشش حرارتی با جریان چرخشی آب گرم تحت دمای میانگین ۳۷ درجه سلسیوس قرار گرفت. به منظور جلوگیری از ایجاد کف و تشکیل پوسته‌های سطحی بر روی سطح لجن در راکتور و همچنین یکنواخت نگاه داشتن محلول از نظر غلظت و درجه حرارت، محتویات داخل مخزن از طریق همزن به صورت ناپوسته مخلوط شد. اختلاط از طریق همزن مکانیکی به طور متوسط ۳ روز در هفته هر بار ۳ ساعت با سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه انجام شد (۲۹). این فرآیند ۳۸ روز به طور مداوم انجام شد. در طول این مدت فشار نسبی

زمانی و همکاران: بررسی هضم بی‌هوازی ترکیب زیاله‌های...

حجم مخزن گاز بیورآکتور (V_1) معادل ۳۰ لیتر در نظر گرفته شد.

جدول ۴ به دست آمد؛ همانگونه که ملاحظه می‌شود در حالت نظری میزان بیوگاز تولیدی با در نظر گرفتن راندمان تبدیل ۸۳ درصد، حدود ۵۶ درصد است و حجم گاز متان تولید شده به ازاء هر کیلوگرم ماده جامد فرار ۰/۳۷ مترمکعب (معادل ۳۷۰ لیتر بر کیلوگرم ماده جامد فرار) در طول فرآیند است.

نتایج

نتایج موازنه جرم و استوکیومتری تولید بیوگاز در حالت نظری

از آنجائیکه مواد جامد فرار در مواد زائد شهری قزوین ۶۳/۷ درصد (جدول ۲) بود و چنانچه مقدار تجزیه مواد ارگانیک ۸۰ درصد و راندمان تبدیل مواد ارگانیک به بیوگاز ۸۳ درصد در نظر گرفته شود (۲۴)، نتایج حاصل از موازنه جرم بر اساس معادلات ۱ و ۲ طبق

جدول (۴) نتایج موازنه جرم و استوکیومتری تولید بیوگاز

Table 4- Results of mass balance and stoichiometry of biogas production

واحد unit	مقدار value	پارامتر Parameter
%	55.9	متان
	8	Methane
%	44.0	دی‌اکسید کربن
	1	carbon dioxide
$\frac{m^3 nCH_4}{kgVS}$	0.37	حجم گاز متان تولیدی به ازاء هر کیلوگرم جامد فرار (VS) Volume of methane gas produced per kilogram of volatile solid (VS)
$\frac{m^3 nC}{kgVl}$	0.47	حجم گاز متان تولیدی به ازاء هر کیلوگرم جامد فرار تجزیه شده (VDS) The amount of methane gas produced per kilogram of decomposed volatile solids (VDS)
$\frac{m^3 nbiog}{kgVDS}$	0.84	حجم بیوگاز تولیدی به ازاء هر کیلوگرم جامد فرار تجزیه شده (VDS) Volume of biogas produced per kilogram of decomposed volatile solids (VDS)
$\frac{m^3 nC}{kgVl}$	0.56	حجم گاز متان تولیدی به ازاء هر کیلوگرم جامد فرار تجزیه شده با در نظر گرفتن بازدهی تبدیل تجزیه (VBS) The volume of methane gas produced per kilogram of volatile solid decomposed, taking into account the decomposition conversion efficiency (VBS)
$\frac{m^3 nbiog}{kgVBS}$	1.01	حجم بیوگاز تولیدی به ازاء هر کیلوگرم جامد فرار تجزیه شده با در نظر گرفتن بازدهی تبدیل تجزیه (VBS) The volume of biogas produced per kilogram of decomposed volatile solids, taking into account the decomposition conversion efficiency (VBS)
$\frac{kgCOD}{m^3 \cdot day}$	1.58	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) Chemical Oxygen Demand (COD)

ماده خشک که متشکل از مواد آلی و خاکستر است بخش اصلی مواد تجزیه پذیر در فرآیند تولید بیوگاز است. خاکستر نیز متشکل از اجزایی است که فعالیت میکروارگانیسم‌ها را بهبود می‌بخشد که گاهی در فرآیند هضم، تجزیه نشده و باقی می‌ماند. اگرچه در این مطالعه، میزان خاکستر در طی فرآیند، به میزان ۲ درصد برای مرحله اول و به میزان ۴/۷ درصد برای مرحله دوم کاهش یافته است که نشان از مشارکت این ماده در بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌ها بوده است. همانگونه که در جدول ملاحظه می‌شود در هر دو مرحله آزمایش‌ها، ماده آلی خوراک اولیه در طی فرآیند هضم کاهش یافته است که این مبین تجزیه این مواد در طی فرآیند بوده است. همچنین درصد تبدیل ماده خشک از خوراک اولیه به ماده ثانویه در مرحله ۱ و ۲ به ترتیب ۸/۲ و ۱۰/۵ درصد بوده است که نشان از آن دارد که در مرحله دوم که در آن از ترکیب کود دامی استفاده شده است درصد تبدیل ماده خشک به میزان ۲/۳ درصد بیشتر بوده و فرآیند در جهت تولید بیوگاز پیشرفت داشته است.

نرخ تغییرات فشار و حجم بیوگاز در مخزن هاضم در فرآیند هضم

شکل ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات فشار و حجم بیوگاز به ازاء واحد جرم خوراک در مخزن هاضم در طی فرآیند تجزیه و در هر مرحله آزمایشی را نشان می‌دهد. همانگونه که قبلاً اشاره شده بود فرآیند هضم در بیوراکتور در مرحله اول و دوم به ترتیب ۳۸ و ۳۲ روز به طول انجامیده بود. لذا در طی این مدت روند تغییرات فشار نسبی درون مخزن بیوگاز به طور روزانه توسط فشارسنج اندازه‌گیری و ثبت شد تا بتوان منحنی تغییرات فشار نسبی گاز قابل ترسیم باشد.

ترکیب و تبدیل عناصر گازی در فرآیند تولید بیوگاز

در جدول ۵ نتایج حاصل از تجزیه عناصر گازی تشکیل دهنده خوراک اولیه و مواد حاصل از تجزیه بی‌هوازی آن در فرآیند تولید بیوگاز را که توسط دستگاه کروماتوگرافی گازی به دست آمده است ارائه شده است. درصد چهار عنصر اصلی شامل کربن، نیتروژن، هیدروژن و گوگرد مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس داده‌های جدول ۵ نسبت کربن به ازت (C/N) در خوراک اولیه و مواد باقیمانده در مرحله اول و دوم به دست آمد. بدین ترتیب این نسبت برای خوراک اولیه و مواد باقیمانده در مرحله اول به ترتیب ۱۹/۳۹ و ۲۷/۶۴ و برای مرحله دوم به ترتیب ۱۸/۶۰ و ۲۸/۲۳ برآورد شد. همانگونه که ملاحظه می‌شود درصد تبدیل کربن و ازت هم در مرحله اول و هم در مرحله دوم آزمایش‌ها افزایش یافته است به گونه‌ایکه این مقادیر برای کربن و ازت به ترتیب به میزان ۲/۶۲ و ۳۱/۶۸ درصد برای مرحله اول و ۲۳/۰۸ و ۴۹/۳۲ درصد برای مرحله دوم بوده است. این امر نشان دهنده آن است که در مرحله دوم در مقایسه با مرحله اول نقش این دو عنصر در فرآیند تولید بیوگاز موثرتر شده و باید انتظار تولید بیوگاز بیشتری در فرآیند را داشت چراکه افزایش تبدیل ماده آلی و نیز ازت به منزله تجزیه موثرتر این مواد توسط میکروارگانیسم‌ها بوده است که این نتیجه با افزودن کود دامی به خوراک اولیه حاصل شده است که با نتایج پژوهش الماسی و همکاران^۱ (۱۳۹۲) و یوسفی و بحری^۲ (۱۳۹۹) مطابقت دارد (۲ و ۲۸).

ترکیب مواد اولیه و ثانویه در فرآیند تولید بیوگاز

جدول ۶ نتایج تجزیه آزمایشگاهی مواد اولیه (خوراک) و مواد ثانویه (حاصل از تجزیه بی‌هوازی) را در هر دو مرحله آزمایش‌ها نشان می‌دهد. در این جدول تغییرات مقادیر ماده آلی، ماده خشک، رطوبت و خاکستر خوراک اولیه و ماده ثانویه در طی فرآیند تجزیه بی‌هوازی در بیوراکتور ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود

1- Almasi et al.

2- Yousefi and Bahri

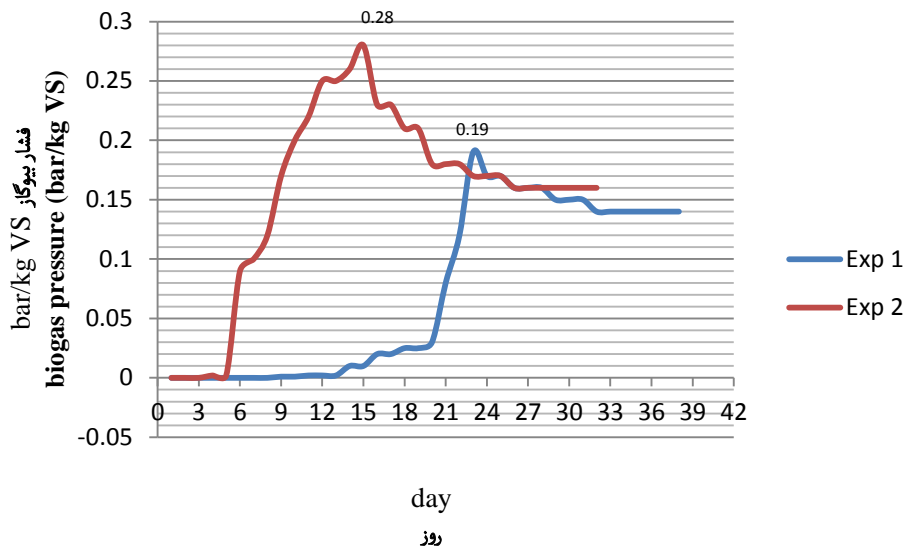
زمانی و همکاران: بررسی هضم بی‌هوازی ترکیب زیاله‌های...

جدول (۵) عناصر گازی موجود در خوراک و مواد باقیمانده در فرآیند تولید بیوگاز و درصد تبدیل آنها
Table (5) Gaseous elements in the feed and residual materials in the biogas production process and their conversion percentage

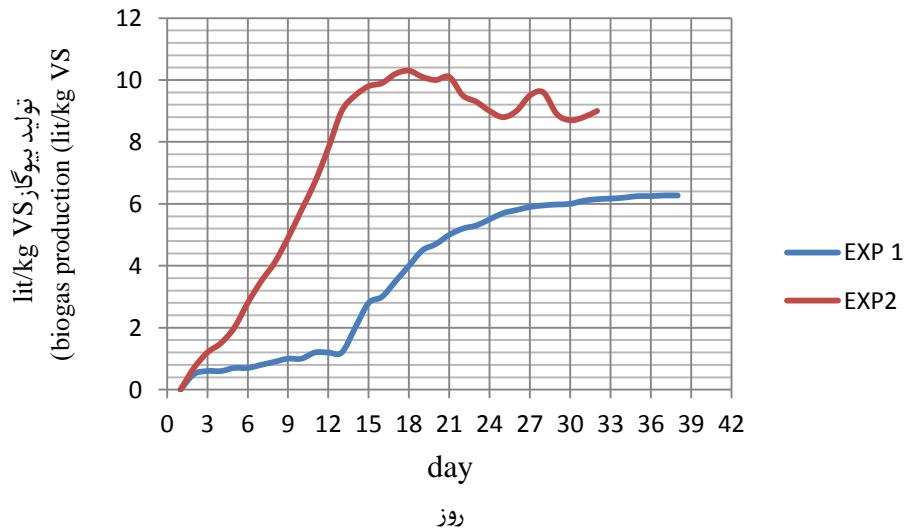
تبدیل نیتروژن (درصد)	تبدیل کربن (درصد)	عنصر (درصد)	Element (%)				مراحل آزمایش Test steps	
			C/N	S	H	N		C
31.68	2.62	خوراک اولیه	19.39	9.95	1.95	2.02	39.18	آزمایش مرحله ۱
		Basic food	27.64	2.14	0.84	1.38	38.15	Test step 1
49.32	23.08	ماده ثانویه	18.60	8.19	2.08	2.21	41.11	آزمایش مرحله ۲
		Secondary material	28.23	1.64	1.79	1.12	31.62	Test step 2

جدول (۶) ترکیب خوراک اولیه و مواد ثانویه در فرآیند هضم بی‌هوازی
Table (6) Composition of primary feed and secondary materials in anaerobic digestion process

متغیر (درصد)				مراحل آزمایش Test steps
Variable (%)				
خاکستر ash	رطوبت moisture	ماده خشک dry matter	ماده آلی Organic matter	
11.10	44.30	55.70	44.60	خوراک اولیه Basic food
9.10	48.90	51.10	42.00	ماده ثانویه Secondary material
6.40	44.30	55.70	49.30	خوراک اولیه Basic food
4.60	50.20	49.80	45.30	ماده ثانویه Secondary material



شکل (۳) تغییرات فشار بیوگاز به ازاء واحد جرم خوراک در مخزن هاضم در طی فرآیند تجزیه
 Figure 3- Biogas pressure changes per unit of feed mass in the digester tank during the decomposition process



شکل (۴) تغییرات حجم بیوگاز به ازاء واحد جرم خوراک در مخزن هاضم در طی فرآیند تجزیه
 Figure 4- Biogas volume changes per unit of feed mass in the digester tank during the decomposition process

اول به اتمام رسید و بیوگاز و مواد باقیمانده (ثانویه) تخلیه گردید. بیشینه فشار بیوگاز در آزمایش مرحله دوم به میزان ۰/۲۸ بار بر کیلوگرم ماده جامد بود که در روز ۱۵ حاصل شد و در نهایت پس از گذشت ۲۶ روز فشار به مقدار ۰/۱۶ رسیده و به مدت هفت روز در این فشار تثبیت شد. لذا فرآیند هضم در مرحله دوم به مدت ۳۲ روز به طول انجامید. لذا می توان مشاهده کرد که با

بر اساس نمودار شکل ۳، تغییرات فشار بیوگاز داخل مخزن در آزمایش مربوط به مرحله ۱ به مقدار بیشینه خود (۰/۱۹ بار بر کیلوگرم) در مدت ۲۳ روز پس از آغاز فرآیند رسیده و سپس در هفت روز پایانی در مقدار ۰/۱۴ بار بر کیلوگرم ماده جامد تثبیت شده است. از آنجائیکه معیار اتمام فرآیند هضم تثبیت فشار در هفت روز متوالی بوده است لذا پس از ۳۸ روز، فرآیند مرحله

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این مطالعه مشخص شد که در مرحله دوم در مقایسه با مرحله اول نقش دو عنصر کربن و ازت در فرآیند تولید بیوگاز موثرتر شده و باید انتظار تولید بیوگاز بیشتری در فرآیند را داشت چراکه افزایش تبدیل ماده آلی و نیز ازت به منزله تجزیه موثرتر این مواد توسط میکروارگانیسم‌ها بوده است که این نتیجه با افزودن کود دامی به خوراک اولیه حاصل شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌توان استنباط کرد که در فرآیند تولید بیوگاز، ترکیب کودهای حیوانی با پسماند آلی شهری علاوه بر کاهش زمان ماند، می‌تواند به افزایش راندمان تولید بیوگاز کمک کند که در این مطالعه به میزان ۳۸ درصد افزایش تولید بیوگاز در حالت به کارگیری ترکیب کود دامی با پسماند آلی شهری در مقایسه با به کارگیری فقط پسماند آلی شهری مشاهده شد. اگرچه می‌توان نقش سایر متغیرها نظیر دما، نوع و میزان همزدگی، نوع آماده‌سازی اولیه مواد از نظر اندازه، رطوبت، pH، افزودن مخمر و باکتری، درجه ناخالصی و سمیت مواد، نسبت کربن به ازت، نوع و اندازه رآکتور و سایر متغیرها را مورد بررسی قرار داد.

بکارگیری کود دامی در خوراک اولیه و با ثابت در نظر گرفتن سایر متغیرها، مدت زمان ماند در مقایسه با مرحله اول به مدت ۶ روز کاهش یافته است

همانگونه که در نمودار شکل ۴ ملاحظه می‌شود مقادیر روزانه تولید بیوگاز بر اساس رابطه ۴ محاسبه و برای هر دو مرحله (Exp1 و Exp2) ترسیم شد. بیشینه مقدار بیوگاز تولیدی در مرحله ۱ برابر با ۶/۲۷ لیتر بر کیلوگرم ماده جامد و در مرحله ۲ برابر با ۱۰/۳ لیتر بر کیلوگرم ماده جامد به دست آمد. همانگونه که ملاحظه می‌شود با بکارگیری کود دامی در ترکیب با پسماند آلی شهری، حجم تولید بیوگاز در شرایط یکسان افزایش یافته است. با در نظر گرفتن میزان تجمعی تولید بیوگاز مشخص شد که در مرحله ۱ و ۲ به ترتیب به میزان ۱۴۰/۸۹ و ۲۳۰ لیتر بر کیلوگرم ماده جامد بیوگاز در طی دوره هضم تولید شده است. لذا بازده تولید بیوگاز به میزان ۳۸ درصد افزایش داشته است. اگرچه میزان کل بیوگاز تولیدی در هر دو مرحله آزمایش‌ها در مقایسه با مقادیر نظری به دست آمده در این مطالعه (به میزان ۳۷۰ لیتر بر کیلوگرم ماده جامد) و نیز مقادیر گزارش شده توسط پژوهشگران دیگر (Salehoun, et.al, 2020 و Kozminesky, 1995) کمتر بود.

References

- 1- Alikhan, O.M., and Khoramnejadian, S. 2023. Identifying and ranking factors influencing the sustainable development of environmental culture in sports. *Journal of Sustainable, Development and Environment*. 3(4): 91-102 (in Persian with English abstract)
- 2- Almasi, F., Jafari, A., Nosrati, M., Akram, A., Afazeli, H., and Feghipoor, F. 2012. Investigating the effect of plug anaerobic digester feed on the amount of biogas production. The 4th National Bioenergy Conference of Iran, Tehran. (in Persian with English abstract)
- 3- Appels, L.; Lauwers, J.; Degrve, J.; Helsen, L.; Lievens, B.; Willems, K.; Van Impe, J., and Dewil, R. 2011. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Review*. 15: 4295–4301
- 4- Brennan, L., and Owende, P. 2010. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Review*. 14:557–577
- 5- Gray, D., Suto, P., and Peck, C. 2008. Anaerobic digestion of food waste. Final report by East Bay Municipal Utility District on procedures and opportunities provided by anaerobic digestion of food waste programs in wastewater treatment facilities.
- 6- Hartmann, H., and Ahring, B.K. 2005. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of codigestion with manure. *Journal of Water research*. 39(8):1543-52
- 7- Iran Students News Agency-ISNA. 2018. <https://en.isna.ir/>
- 8- Jabari, V., Safari, A.R., and Ranaei, A.R. 2016. Measuring the Heating value of municipal solid waste mixed with the output waste from processing facilities and comparing the results with Tanner triangle for assessment of combustibility of Waste (A case study on the garbage of Qazvin). *Journal of Research in Environmental Health*. 1: 245-322 (in Persian with English abstract)
- 9- Khalid, A.; Arshad, M.; Anjum, M.; Mahmood, T., and Dawson, L. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Journal of Waste Management*. 31: 1737–1744
- 10- Khan, D., Kumar, A., and Samadder, S.R. 2016. Impact of socioeconomic status on municipal solid waste generation rate. *Journal of Waste Management*. 49: 15–25
- 11- Kiran, E.U., Trzcinski, A.P., Ng, W.J., and Liu, Y. 2014 . Bioconversion of food waste to energy: a review. *Journal of Fuel*. 134:389- 99
- 12- Kizilaslan, H., and Onurlubas, H.E. 2010. Potential of Production of Biogas from Animal Origin Waste in Turkey (Tokat Provincial Example). *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 9(6):1083-7
- 13- Kreith, F., and Tchobanoglous, G. 1994. Hand book of solid waste management. Mc-graw-Hill, New York.
- 14- Kumar, A., and Samadder, S.R. 2017. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Journal of Waste Management*. 69:407–22
- 15- Maria, F., Barratta, M., Bianconi, F., Placidi, P., and Passeri, D. 2017. Solid anaerobic digestion batch with liquid digestate recirculation and wet anaerobic digestion of organic waste: Comparison of system performances and identification of microbial guilds. *Waste Management*. 59: 172–180
- 16- Martinez, E., Marcos, A., Al-Kassir, A., Jaramillo, M.A., and Mohamad, A.A. 2012. Mathematical model of a laboratory-scale plant for slaughterhouse effluents biodigestion for biogas production. *Journal of Applied Energy*. 95: 210–219

- 17-Ofoefule, A., Nwankwo, J.I., and Ibeto, C.N. 2010. Biogas Production from Paper Waste and its blend with Cow dung. *Journal of Advances in Applied Science Research*. 1(2):1-8
- 18-Pavi, S., Kramer, L.E., Gomes, L.P., and Miranda, LAS. 2017. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Journal of Bio resource Technol.* 228:362-7
- 19-Rivas-García, P. 2020. New model of hydrolysis in the anaerobic co-digestion of bovine manure with vegetable waste: modification of anaerobic digestion model no. 1, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 19(1): 109-122
- 20-Safley, L., and Westerman, P. 1992. Performance of a low temperature lagoon digester. *Journal of Bio resource Technology*. 41(2):167-75
- 21-Satyanarayan, S., and Murkute, P. 2008. Biogas production enhancement by Brassica compestris amendment in cattle dung digesters. *Journal of Biomass and Bioenergy*. 32(3): 210-5
- 22-Scaglione, D., Caffaz, S., Ficara, E., Malpei, F., and Lubello, C. 2008. A simple method to evaluate the short-term biogas yield in anaerobic codigestion of WAS and organic wastes. *Journal of Water Science and Technology*. 58(8): 1615-22
- 23-Shariat Hosseini, S.A., Bashi Shahabi, P., and Bashirnezhad, K., 2020. Evaluation of Biogas Production from Municipal Solid Waste Using Continuous Anaerobic Fermentation Reactors: Case of City of Mashhad. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*; 7 (1) :87-130 (in Persian with English abstract)
- 24-Saghoori, M., Abdi, R., Ebrahimi Nik, M.A., Roohani, A., and Meysami, M.A. 2021.Solid State Anaerobic Digestion of Organic Part of Municipal Solid Waste for Biogas Production (Case Study in Mashhad). *Journal of Agricultural systems and mechanization research*. 76(3) :69-86 (in Persian with English abstract)
- 25-Song, Z., Yang, G., Guo, Y., and Zhang, T. 2012. Comparison of two chemical pretreatments of rice straw for biogas production by anaerobic digestion. *Journal of Bio Resources*. 7(3): 3223-36
- 26-Ten Brummeler, E., Aarnink, M., and Koster, I. 1992. Dry anaerobic digestion of solid organic waste in a biocel reactor at pilot-plant scale. *Journal of Water Science and Technology*. 25(7): 301-310
- 27-Vivekanandan, S., and Kamaraj, G. 2011.The study of biogas production from rice chaff (karukka) as co-substrate with cow dung. *Indian Journal of Science and Technology*. 4(6):657-9
- 28-Yousefi, L., and Bahri, A. 2021. Laboratory Investigation of Cow Manure and Digested Synergistic with Municipal Organic Solid Waste in Anaerobic Digestion Process for Efficiency Increasing. *Journal of Environmental. Science and Technology*. 23(4):259-270 (in Persian with English abstract)