



Original Article

Simulation of Mixing Effect on Methane Production in Anaerobic Digestion

Mohammad Mohammadi¹, Arman Jalali^{1*}, Shamsollah Abdollahpour¹

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

ADM1,
Biogas,
CFD,
Mixing

Received:
September 23, 2024

Revised:
November 10, 2024

Accepted:
November 16, 2024

* Corresponding author:
a.jalali@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Anaerobic digestion of materials is one of the accepted technologies in the field of industry. In this technology, providing the necessary conditions for optimal mixing of materials is of great importance. In this research, the mixing process was simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD), and the possibility of predicting the kinetic process of biogas production from animal waste and determining the optimum speed of the stirrer during the process was investigated. In the initial stages of the work, data related to an anaerobic digester with an agitator, and mixing speeds of 0, 100, and 150 rpm were recorded for one month, and the measured characteristics were converted into the inputs of the ADM1 model. Then, the initial values that were reported during the start-up stage of the digester were estimated. The reactor was optimized to a volume of 400 liters. The stirring system is mechanical and works for five minutes every 6 hours at speeds of zero, 100, and 150 rpm. According to the graphs and the results, the produced gas has almost a constant trend from the 15th day onwards and reaches 75% of methane, and the highest average percentage of methane produced is 64%, which happened at a stirring speed of 100 rpm. During the experiments, the pH was in the range of 5.7 to 7.3.

Introduction

As the population increases and energy resources are limited, all countries will face energy problems. The crises that threaten countries and societies are the lack of energy resources (fossil fuels) and the increase in environmental pollution caused by excessive consumption of fossil fuels, which shows the necessity and importance of using alternative energy sources. The close connection between economic and environmental issues has created new approaches in the field of international environmental law, one of the most prominent of which is the green economy, and since one of the main goals of the green economy is to reduce greenhouse gas emissions, the use of renewable energy sources is a fast way to Achieving a green economy. Mixing is an important process in AD that has the following advantages: (1) It promotes direct contact among enzymes, bacteria, and substrates; (2) It avoids foam formation and sedimentation; (3) It enhances heat and mass transfer; (4) It facilitates the release of biogas; (5) It disperses any toxic materials in the influent to avoid inhibitions. Some researchers also compared different intermittently mixed anaerobic digesters.

Materials and Methods

In this research, a digester with a diameter of 60 cm was used and the volume of the digester was 0.4 cubic meters. The standard volume of the maximum substrate that can be loaded is 0.325 cubic meters. Digester stirring is done by a mechanical stirrer connected to an electric motor in the central part of the top of the cap. The whole digester has a capacity of three layers of materials, each layer has its own sensors. Acidity and temperature sensors collect the relevant variable status and store and transfer it to virtual memory through the electronic control system. The anaerobic digester system in the bioenergy and recycling laboratory unit has been repaired, and a sample of cow manure was prepared from the animal husbandry

How to cite:

Mohammadi, M., Jalali, A. and Abdollahpour, Sh. (2025). *Simulation of Mixing Effect on Methane Production in Anaerobic Digestion*. Journal of Agricultural Mechanization, 9 (4):43-58. <https://doi.org/10.22034/jam.2024.63498.1294>.



unit around Tabriz and transferred to the laboratory as a substrate for conducting research. The experiment was done in three repetitions, and in each repetition, 150 kg of fresh animal waste was poured into the digester tank with 150 liters of water. Then, to add methanogenic microorganisms to the substrate, 10% of the total weight of the tank (substrate), i.e. 30 kg of animal rumen, was prepared and added. Each repetition of this process continued for 30 days, and the temperature inside the tank was kept at the same temperature as the outside environment (30 degrees Celsius) in the first repetition, and at 35 degrees Celsius in the second and third repetitions. Mixing was done automatically for 5 minutes only in the second and third repetitions and every 6 hours, and the mixing speed was set to 100 and 150 rpm, respectively. After the system started working, gas was discharged twice a day (every 12 hours) according to the production rate and pressure. The total amount of methane produced until that day was measured on the meter and the percentage of methane gas produced daily was measured by the methanometer. Also, in this research, using computational fluid dynamics (CFD), the prediction of the kinetic process of biogas production from animal waste and the provision of the appropriate stirring cycle during the anaerobic digestion process was investigated. In the initial stages of the work, data related to an anaerobic digester with an agitator, and mixing speeds of 0, 100, and 150 rpm were recorded for one month, and the measured characteristics were converted into the inputs of the ADM1 model. Then, the initial values that were reported during the start-up stage of the digester were estimated.

Results and Discussion

According to the graphs and the results, the produced gas has almost a constant trend from the 10th day onwards and reaches 75% of methane, and the highest average percentage of methane produced is 64%, which happened at a stirring speed of 100 rpm. During the experiments, the pH was in the range of 5.7 to 7.3. Gas production is approximately fixed from the 15th day onwards and reaches 80% of methane. As can be seen in the figure, biogas production usually decreases on days with increased loading; In every change of the input organic load, the largest amount of freshly undigested feed enters the system, so the digestion steps begin with cell destruction and hydrolysis. These steps are often time-consuming and, in addition, the products of the hydrolysis step are acidic. Therefore, it is expected that the activity of biogas production microorganisms will decrease with the acidification of the environment.

Conclusion

In this work, the effects of mixing time on AD performance were studied experimentally and numerically. The results showed that when the mixing time in intermittent mixing mode was long enough to homogenize the digester, then increasing the mixing time would not increase biogas yield but increase energy input. However, if the digester cannot reach homogeneity within the mixing time in intermittent mixing mode, then the digester cannot operate in its optimum condition. These results indicated that simulated mixing time can be used as a reference to determine the minimal experimental mixing time to increase the AD efficiency.



شبیه‌سازی اثر همزنی بر تولید متان در هضم بی‌هوازی

محمد محمدی^۱، آرمان جلالی^{۱*}، شمس اله عبدالله پور^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

۱- گروه مهندسی بیوسیستم - دانشکده کشاورزی - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

* نویسنده مسئول: E-mail: a.jalali@tabrizu.ac.ir

چکیده

هضم بی‌هوازی مواد در حوزه صنعت یکی از فناوری‌های پذیرفته‌شده است. در این فناوری، فراهم آوردن شرایط لازم برای اختلاط بهینه مواد از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، فرآیند اختلاط با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) شبیه‌سازی شد و امکان پیش‌بینی روند سینتیک تولید بیوگاز از پسماندهای دامی و تعیین دور بهینه همزن در طی فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. در مراحل اولیه کار داده‌های مربوط به یک هاضم بی‌هوازی دارای همزن، سرعت‌های همزنی صفر، ۱۰۰ و ۱۵۰ دور در دقیقه به مدت یک ماه ثبت شد و مشخصه‌های اندازه‌گیری شده در ورودی‌های مدل^۲ ADM1 تبدیل شد. سپس مقادیر اولیه که در مرحله راه‌اندازی هاضم گزارش شده بود، برآورد شد. رآکتور به حجم ۴۰۰ لیتر بهینه‌سازی شد. سامانه همزن به صورت مکانیکی بوده و در هر ۶ ساعت به مدت پنج دقیقه با سرعت‌های صفر، ۱۰۰ و ۱۵۰ دور در دقیقه کار می‌کرد. بر اساس نمودارها و نتایج حاصله گاز تولیدی از روز ۱۱۵ام به بعد تقریباً روند ثابتی یافته و به مقدار ۷۵ درصد متان می‌رسید و بیشترین میانگین درصد متان تولیدی، ۶۴ درصد بود که در سرعت همزنی ۱۰۰ دور در دقیقه اتفاق افتاد. در طول اجرای آزمایش‌ها، pH در محدوده ۵/۷ تا ۷/۳ قرار داشت.

کلمات کلیدی: بیوگاز، دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی، مدل‌سازی هضم بی‌هوازی، همزنی

¹ Computational Fluid Dynamic

² Anaerobic Digestion Model no.1



۱- مقدمه

با افزایش جمعیت و محدود شدن منابع انرژی، تمام کشورها با مشکلات انرژی روبرو خواهند شد. بحران‌هایی که کشورها و جوامع را تهدید می‌کند عبارت‌اند از: کمبود منابع انرژی (سوخت‌های فسیلی) و افزایش آلودگی زیست‌محیط ناشی از مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی است که ضرورت‌ها و اهمیت استفاده از منابع انرژی جایگزین را نشان می‌دهد. پیوند نزدیک بین مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی باعث ایجاد رویکردهای جدیدی در زمینه حقوق بین‌الملل محیط‌زیست شده که یکی از برجسته‌ترین آن‌ها اقتصاد سبز است و از آنجا که یکی از اهداف اصلی اقتصاد سبز، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر راهی سریع برای دستیابی به اقتصاد سبز است (Daneshvari et al, 2020).

مشکل انرژی یکی از اساسی‌ترین مشکلات جهان به شمار می‌رود بنابراین روش‌های دیگر تولید انرژی که معایب روش‌های مرسوم را ندارند، امری متداول در سراسر جهان شناخته شده است. از جمله این روش‌ها، تولید انرژی از زیست‌توده است. یکی از فناوری‌های تبدیل زیست‌توده به انرژی، فرایند بیوشیمیایی است. این فرایندها به تخمیر بی‌هوازی، هوازی و الکلی زیست‌توده تقسیم می‌شوند. بیوگاز از تخمیر بی‌هوازی زیست‌توده حاصل می‌شود. در تولید بیوگاز از زیست‌توده علاوه بر تولید انرژی، کود ارگانیک، افزایش سطح بهداشت عمومی جامعه و کنترل بیماری‌ها، راه‌حل مناسبی برای دفع مواد زائد از جوامع انسانی نیز است. فناوری‌های تولید بیوگاز به دلیل تولید انرژی تجدیدپذیر و پاک، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، تولید کودآلی مناسب برای تولید محصولات کشاورزی و تیمار مواد زائد خطرناک و پسماندهای صنعتی تحت تخمیر بی‌هوازی اهمیت فراوانی دارد (Hoshyar, 2011).

برخی از مزایای استفاده از پسماند دامی به عنوان منبع تولید بیوگاز عبارتند از:

۱) نسبت کربن به نیتروژن در آن در مقایسه با سایر زیست‌توده‌ها مقدار متوسطی داشته و برای کنترل آن نیاز به افزودنی‌های بعدی وجود ندارد که این امر سبب تسهیل در کنترل شرایط درون هاضم می‌شود (Show et al, 2013).

۲) در مقایسه با سایر زیست‌توده‌ها، پسماند دامی به جز در مواردی به عنوان کود، کاربرد چندانی ندارد که استفاده از آن هم سبب مدیریت بهتر دامداری‌ها شده و هم باعث کاهش آلودگی بر اثر تولید گازهای گلخانه‌ای از پسماند راکد می‌شود. البته می‌توان از مواد ته‌نشین شده درون هاضم که سهم چندانی در تولید متان ندارند باز هم به عنوان کود استفاده نمود (Arzate Salgado, 2019).

۳) در مقایسه با اکثر زیست‌توده‌ها نظیر پسماند مطبخ یا فضلاب شهری، پسماند دامی فاقد مواد سمی و آلوده است و در

بیشتر موارد نیاز به تصفیه اولیه ندارد که در صرفه جویی هزینه‌ها و زمان حائز اهمیت می‌باشد.

۴) زمان ماند میکروارگانسیم‌های آغازگر در پسماند دامی کمتر از سایر زیست‌توده‌هاست که این امر سبب کاهش مدت زمان ماند هیدرولیکی درون هاضم می‌شود (Beiki and Jananeh, 2019).

Norouzi, N., & Khajepour, H. (2021) یک مدل بیوراکتور ناپیوسته برای تولید گاز متان از فضولات حیوانی به طور عددی شبیه‌سازی شد، در این مدل از سینتیک مونود برای بیان رابطه بین سرعت رشد میکروارگانسیم‌ها و غلظت سوبسترا استفاده گردید. اثر غلظت اولیه میکروارگانسیم‌ها بر تولید گاز متان نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده برای تخمین تولید متان و ارتباط با عوامل مختلف موثر می‌باشد.

Aworanti et al (2011) برای پیش‌بینی فرآیندهای میکروبی در تولید بیوگاز از فضولات حیوانی انجام شد. از مدل ریاضی برای توسعه و شبیه‌سازی این فرآیندها استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی‌ها را برای تمام پارامترهای شبیه‌سازی شده با دقت بالایی انجام می‌دهد.

Baltrėnas, et al (2018) تحقیقاتی در مورد بیوراکتور دسته‌ای انجام دادند که برای تولید بیوگاز از لجن فاضلاب، زباله‌های گیاهی و سایر مواد آلی طراحی شده است. این بیوراکتور با حفظ دمای بهینه و غلظت اکسیژن، و همچنین شدت اختلاط، تولید متان را توسط کلونی باکتری‌های متانوژن فعال می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که با استفاده از مواد بسته‌بندی مختلف و با بارگذاری آلی متفاوت، بالاترین غلظت متان و بازده بیوگاز به دست آمده است.

Zhai et al (2018) تحقیقی در مورد تأثیر اختلاط بر تولید متان از فرآیند هضم بی‌هوازی انجام دادند. با استفاده از یک هاضم مقیاس پایلوت به حجم ۱ مترمکعب با سه شدت اختلاط مختلف، تأثیرات آن بر روی تولید متان بررسی شد. نتایج نشان داد که شدت اختلاط ۱۰۰ دور در دقیقه بهترین عملکرد را داشته و این نشان می‌دهد که آستانه شدت اختلاط وجود دارد و افزایش بیش از این ممکن است تأثیر منفی داشته باشد. در حالی که شدت اختلاط ۵۰ دور در دقیقه به عنوان گزینه اقتصادی در نظر گرفته شد، حتی با ثبت مناطق مرده. در نهایت، استفاده از حداقل اختلاط متناوب یک بار در روز برای حفظ فرآیند هضم بی‌هوازی و بهینه‌سازی تولید متان کافی است. دینامیک سیالات محاسباتی نشان داد که شدت اختلاط ۱۰۰ دور در دقیقه به میزان کافی برای همگن کردن محتوای هاضم است و از CFD برای پیش‌بینی زمان اختلاط در هاضم استفاده شد.

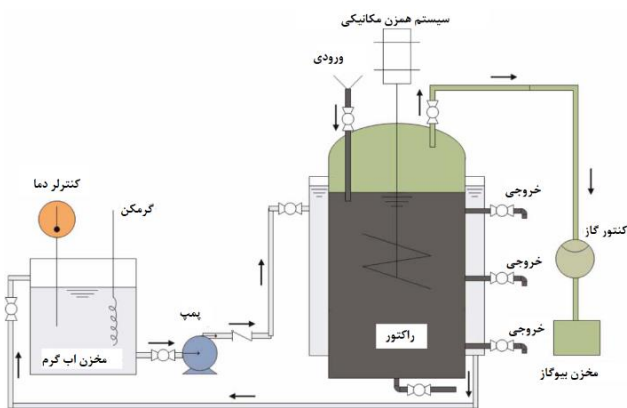
با توسعه فناوری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، محققان بیشتری به بررسی اثر اختلاط بر هضم بی‌هوازی می‌پردازند و سناریوی اختلاط را بهینه می‌کنند. Bell-Mendoza et al (۱۹۹۸) اثر یک رژیم کاملاً مخلوط و یک اختلاط ناقص بر هضم بی‌هوازی را

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی راکتور (هاضم بی‌هوازی)

واکنش‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی هضم بی‌هوازی در داخل مخزن هاضم اتفاق می‌افتد که به عنوان بیوراکتور یا راکتور بی‌هوازی نیز شناخته می‌شود. در واقع هاضم به عنوان ساختمان بیوگاز است و هر راکتور از چندین قسمت عمده ساخته می‌شود که در زیر آورده شده است (شکل ۱):

- ۱) حجم داخل راکتور (مخزن)؛
- ۲) شیرهای ورودی و خروجی راکتور؛
- ۳) سامانه همزنی راکتور؛
- ۴) سامانه گرمایش راکتور؛
- ۵) سامانه کنترل خودکار راکتور.



شکل ۱- طرح واره و شکل واقعی هاضم و قسمت‌های مختلف آن

Fig 1. Diagram of the digester system and different parts

مدلسازی کرد. حجم هاضم به دو ناحیه تقسیم شد (نواحی جریان و احتباس)، که در آن انتقال مواد بین دو ناحیه محدود فرض می‌شد. انحراف از یک رژیم کاملاً مخلوط ایده آل با تغییر حجم نسبی ناحیه جریان و زمان گردش مواد در هاضم نشان داده شد. ارزیابی تأثیر پارامترهای اختلاط از نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که منطقه جریان تأثیر قابل توجهی بر عملکرد AD دارد حتی اگر هر دو پارامتر اختلاط برای بازده کلی AD مهم هستند. علاوه بر این، نتایج آنها کاهش تولید متان را به دلیل اختلاط ناقص نشان داد.

(Mao et al (2019) تأثیر زمان اختلاط بر تولید متان از ضایعات غذایی و کود مرغی در هضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار دادند. استفاده از الگوی اختلاط و شدت آشفتگی به دست آمده از CFD برای ارزیابی عملکرد اختلاط در هاضم‌ها با ویسکوزیته‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورتی که هاضم به خوبی تحت حالت اختلاط متناوب با زمان اختلاط کوتاه مخلوط شود، تغییر زمان اختلاط یا نوع اختلاط متناوب به اختلاط پیوسته تأثیر چندانی بر تولید متان نخواهد داشت. از طرفی، هاضم‌هایی که به طور پیوسته مخلوط می‌شوند وقتی که حالت‌های اختلاط متناوب نمی‌توانند به یکنواختی مطلوبی دست یابند، عملکرد بهتری دارند. این نتایج نشان می‌دهد که زمان اختلاط شبیه‌سازی شده از CFD می‌تواند به عنوان مرجعی برای تعیین زمان اختلاط تجربی در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

(Lindmark et al (2014) در تحقیقی نشان دادند که اختلاط می‌تواند بازده بیوگاز را تحت تأثیر قرار دهد، اما دیدگاه‌های مختلف درباره طراحی اختلاط وجود دارد. از روش‌های مختلفی برای ارزیابی اختلاط استفاده شده است، از جمله ردیاب‌های شیمیایی و رادیواکتیو و آنالیز آزمایشگاهی. تأثیرات اختلاط در مراحل مختلف هضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار گرفته و مشکلاتی مانند اثر اختلاط بر زمان ماند جامدات و اندازه‌گیری تولید گاز پایدار بحث شده است. تحقیقات بیشتر با هدف درک عمیق‌تر تأثیرات اختلاط در سطح شیمیایی و میکروبی و در مراحل مختلف هضم بی‌هوازی انجام شده است.

با بررسی‌های که انجام گرفته شد، در زمینه تولید بیوگاز، برای تولید مقدار معین بیوگاز، پسماندی که کمترین قابلیت تولید بیوگاز را دارد، بر اساس بررسی منابع شناسایی شد. چرا که اگر پسماندی در حجم مشخص با قابلیت تولید بیوگاز کمتر، بتواند مقدار معین بیوگاز را تولید نماید. منابع دیگر در همان حجم سوبسترا مقدار بیشتری بیوگاز را تولید خواهند نمود. بر اساس اظهارات Ghaemi and Sadeghi (2013) مقادیر بیوگاز تولید شده به ازای فضولات گاوی برابر 0.04 متر مکعب و به ازای ماده خشک برابر با 0.2 متر مکعب می‌باشد بنابراین از فضولات گاوی برای این آزمایش استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات کلی هر تیمار

Table 1. General characteristics of each treatment

سرعت همزن (rpm)	دما (درجه سلسیوس) (Temp (C)	زمان ماند (روز) (HRT (day)
۰	۳۵	۳۰
۱۰۰	۳۵	۳۰
۱۵۰	۳۵	۳۰

در طی این آزمایش در هر سه تکرار، پارامترهای زیر برای هر روز داده برداری شد:

- (۱) دما؛
- (۲) میزان اسیدیته؛
- (۳) میزان بیوگاز تولید شده کل تا آن روز؛
- (۴) درصد متان بیوگاز آن روز؛

پس از اتمام هر سه تکرار، داده‌های بدست آمده، ذخیره و سپس برای شبیه‌سازی مرتب و آماده شدند. وارد کردن داده‌ها در مدل ADM1 به صورت خام و غیر نرمال، منجر به کاهش سرعت و دقت شبکه خواهد شد، از این رو بایستی داده‌های ورودی به شبکه نرمال‌سازی شود. در صورتی که در این مرحله انجام نگردد، مدل ADM1 در طول مرحله یادگیری، همگرا نخواهد بود. و از این رو نتایج بدست آمده مطلوب نخواهد شد. پس برای نرمالیزه کردن داده‌ها از معادله (۱) استفاده گردید، این رابطه ورودی‌ها را بین صفر و یک استاندارد می‌کند. داده‌های تولید شده با شبکه عصبی، به صورت نرمال خواهند بود که می‌توان با استفاده از معکوس رابطه نرمال‌سازی، به حالت اولیه و واقعی برگرداند.

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad \text{معادله ۱}$$

که در آن:

- X : داده‌های خام و غیر نرمال؛
 X_n : داده‌های نرمال‌سازی شده؛
 X_{\min} : مقدار کمینه داده‌های اولیه؛
 X_{\max} : مقدار بیشینه داده‌های اولیه است.

شبیه‌سازی

هدف از شبیه‌سازی در این طرح پژوهشی بررسی اثر دما و سرعت همزنی برای افزایش تولید متان است که در این تحقیق شبیه‌سازی رفتار سیال به صورت نیوتنی و سه بعدی انجام گرفت. در مطالعه انجام گرفته طراحی هندسه راکتور در نرم افزار workbench و قسمت Ansys Design Modeler انجام گرفت. دامن‌های محاسباتی در مقیاس واقعی ترسیم شد. راکتور در محیط نرم افزار Ansys Desgin Modeler را نشان می‌دهد.

این هاضم در بعد نیمه‌صنعتی بوده و شامل یک محفظه یک پارچه است که در قسمت بالا به کلاهک (گنبد) پیچ شده است. قطر مخزن آن ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد. حجم هاضم ۰/۴ مترمکعب است. جنس هاضم از فولاد ساخته شده است. حجم استاندارد بیش‌ترین سوبسترای که می‌توان در طبقات آن بارگیری کرد ۰/۳۲۵ مترمکعب می‌باشد.

هم‌زنی هاضم توسط همزن مکانیکی که به یک الکتروموتور در قسمت مرکزی بالای کلاهک متصل شده است، انجام می‌پذیرد. کل هاضم دارای گنجایش سه طبقه از مواد می‌باشد که هر طبقه حسگرهای مخصوص خود را دارد. حسگرهای اسیدیته و دما وضعیت متغیر مربوطه را گردآوری کرده و از طریق سامانه الکترونیکی کنترلی، ذخیره و قابل انتقال به حافظه مجازی می‌کنند. این داده‌ها بعداً به رایانه قابل انتقال و طبقه‌بندی می‌شوند. هر طبقه هاضم شامل شیر خروجی خود است که با آب‌بندی ظرفی در آنجا قرار داده شده‌اند و در مواقع لزوم برای تخلیه یا شست‌وشوی درون هاضم استفاده می‌شوند. سه المنت دمایی با زاویه تقریبی ۱۲۰ درجه بر روی محیط سطح مقطع بدنه هاضم قرار دارند که درون جداره بینابینی هاضم پیچ می‌شوند.

داده برداری

داده برداری و آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه بیوانرژی و بازیافت گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام گرفت. سامانه هاضم بی‌هوازی موجود در واحد آزمایشگاه بیوانرژی و بازیافت تعمیر گردیده و نمونه فضولات گاوی از واحد دامداری موجود در اطراف تبریز تهیه و به عنوان سوبسترا برای انجام تحقیقات به آزمایشگاه انتقال یافت.

روش کلی کار

آزمایش در سه تکرار انجام گرفت و در هر تکرار ۱۵۰ کیلو گرم پسماند دامی تازه همرا با ۱۵۰ لیتر آب به داخل مخزن هاضم ریخته شد. سپس برای اضافه کردن میکروارگانیسم‌های متان‌ساز به داخل سوبسترا، معادل ۱۰ درصد وزن کل مخزن (سوبسترا)، یعنی ۳۰ کیلو گرم مقدار شکمبه دام تهیه و اضافه گردید. هر تکرار از این فرایند به مدت ۳۰ روز ادامه یافت و دمای داخل مخزن در تکرار اول، هم‌دما با محیط بیرون (۳۰ درجه سلسیوس) و در تکرارهای دوم و سوم با ۳۵ درجه سلسیوس نگه داشته شد. همزنی تنها در تکرار دوم و سوم و در هر ۶ ساعت به صورت اتوماتیک به مدت ۵ دقیقه انجام می‌گرفت و سرعت اختلاط به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵۰ دور در دقیقه تنظیم شد. پس از شروع به کار سیستم، هر روز دوبار (هر ۱۲ ساعت) با توجه به نرخ تولید و فشار، تخلیه گاز انجام می‌گرفت. مقدار کل متان تولید شده تا آن روز از روی کنتور و درصد متان گاز تولیدی روزانه توسط متان‌سنج اندازه‌گیری شد. مشخصات کلی مخزن در هر تیمار به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

$$\rho_g c_{p,g} \phi \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g c_{p,g} \phi \vec{v} \cdot \nabla T_g = \phi \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T_g) + H_v (T_s - T_g) \quad \text{معادله ۴}$$

T_g : دمای هوا

T_s : دمای ذرات توده متخلخل

(∇T) : افت دما در محیط متخلخل

$C_{p,g}$: حرارت مخصوص فشار ثابت

λ_g : ضریب رسانایی هوا

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}_i}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{v}) \cdot \vec{v} \right) = -\nabla p + \rho g_i + \mu \nabla^2 \vec{v} + F_i \quad \text{معادله ۵}$$

$$\vec{V} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$$

$$\vec{v} = u \vec{i} + v \vec{j} + w \vec{k}$$

P : فشار (Pa)

g_i : شتاب گرانش ($\frac{m}{s^2}$)

μ : ویسکوزیته ($\frac{N}{m^2}$)

F_i : نیروهای خارجی در جهت i (N)

برداشت داده

بخش دیگر این پژوهش مربوط به داده‌برداری از هاضم^۱ CSTR تمام اتوماتیک موجود در آزمایشگاه می‌باشد. هاضم مذکور توسط (Jalali et al, 2021) در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. داده‌برداری این پژوهش هم‌زمان با ارزیابی و بررسی کیفی دستگاه برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل ADM1 انجام پذیرفت. مواد مورد استفاده برای این پژوهش، پسماند دامی بوده است که از دام‌داری محلی تهیه شد. هرچند این هاضم در دو مرحله مورد آزمایش واقع شد، لیکن نتایج حاصل از یک دور از داده‌برداری‌ها با وجود هم‌زنی برای این پژوهش گردآوری شدند. آزمون COD^۲ برای اندازه‌گیری محتوای آلی لجن‌ها و آب‌های طبیعی به کار می‌رود. هم‌ارز اکسیژن ماده آلی که قابل اکسایش است را با استفاده از یک عامل اکساینده شیمیایی در محیطی اسیدی اندازه می‌گیرند. برای تعیین دقیق COD تمام ترکیبات آلی کربنی توسط یک اکسید کننده قوی به کربن‌دی‌اکسید و آب تجزیه می‌گردد و مقدار اکسیژن مصرفی اندازه‌گیری می‌شود. براساس استاندارد ASTM1252D حجم دقیقی از سوبسترای مخلوط شده در حضور اسید سولفوریک غلیظ در پتاسیم‌دی‌کرومات حرارت داده می‌شود تا بخشی از پتاسیم‌دی‌کرومات در واکنش با مواد آلی مصرف شود که با

شبکه‌بندی

شبکه‌بندی دامنه محاسباتی توسط نرم‌افزار Ansys Meshing

انجام گرفت. با توجه به پیچیده بودن هندسه، ترکیبی از شبکه مکعبی و مثلثی استفاده شد.

تعیین شرایط مرزی

پس از طراحی و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی، مرزهای ورودی، خروجی و دیوار تعریف می‌شود که تعیین شرایط مرزی یکی از مهم‌ترین قسمت‌های حل CFD است که باید به‌درستی و با دقت بیشتری انجام شود.

شرط مرزی ورودی: در این شرط مرزی از سرعت ورودی سیال استفاده می‌کنند.

شرط مرزی خروجی: در این شرط مرزی از سرعت خروجی سیال استفاده می‌کنند.

شرط مرزی دیوار: در این شرط مرزی از دمای سیال استفاده می‌کنند.

دریچه ورود سیال = شرط مرزی ورودی

دریچه خروج سیال = شرط مرزی خروجی

مخزن راکتور = شرط مرزی دیوار

معادلات حاکم بر سیال

حل گر نرم افزار انسیس فلونت، محاسبات CFD را با حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی غیرخطی بقای جرم (قانون پیوستگی)، بقای ممنتوم (قانون بقای ممنتوم) و بقای انرژی انجام می‌دهد. بنابراین معادلات حاکم بر حرکت (جریان) سیال معادلات پیوستگی و ممنتوم هستند. روابط هر سه معادله حاکم بر سیستم به صورت ذیل می‌باشد (معادلات ۲، ۳، ۴ و ۵).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad \text{معادله ۲}$$

قانون بقای جرم

معادله بقای جرم برای جریان تراکم‌ناپذیر

$$\rho = cte \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \Rightarrow \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0$$

$$\Rightarrow \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad \text{معادله ۳}$$

$$\text{div}(\vec{v}) = 0$$

ρ : چگالی (kg/m^3)

t : زمان (s)

V : سرعت (m/s)

∇ : گرادیان

$\nabla \cdot \vec{v}$: گرادیان سرعت (دیورژانس میدان برداری)

قانون بقای انرژی

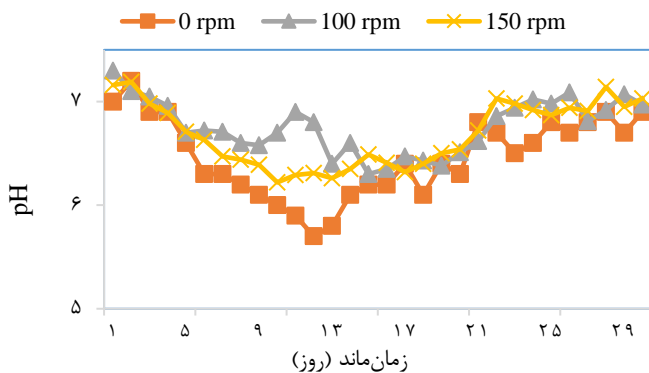
مشخصات بارگذاری پسماند

در این مرحله که اصلی ترین بخش مطالعه پایلوت بوده، ۳ بارگذاری صورت گرفته است. در بارگذاری‌ها زمان ثابت ۵ دقیقه برای هم‌زنی اما در فواصل ۶ ساعت انجام شده است. همچنین به منظور مقایسه نتایج بدون هم‌زنی نیز در نظر گرفته شده است. در جدول مشخصات بارگذاری پسماند نشان داده شده است.

معمولاً هدف از مدل‌سازی برآورد میزان بیوگاز (خصوصاً متان) در طول دوره بهره‌برداری هاضم است. علاوه بر آن، ADM1 توانایی مدل‌سازی موفق دوره راه‌اندازی را ندارد و معمولاً هاضم‌ها بعد از رسیدن به شرایط پایدار مدل می‌شوند. بنابراین در این مطالعه نیز این دوره مدل‌سازی نمی‌شود، اما از اطلاعات دوره راه‌اندازی برای بدست آوردن مقادیر اولیه برای مدل، استفاده شده است. ورودی‌های مورد نیاز برای آنالیز برای هر ۳ بارگذاری محاسبه، برآورد و سپس مدل در فلوئنت اجرا شد. خروجی‌های این آنالیز که در واقع ورودی‌های مدل ADM1 می‌باشند، برای هر ۳ بارگذاری آورده شده است.

روند تغییرات مشخصات pH

نتایج تغییرات pH، در شکل ۲ آورده شده است. بدیهی است که تمامی خروجی‌ها و نتایج حاصل از مدل با تغییر در این ترکیب ورودی، تغییر خواهند یافت.



شکل ۲- نتایج تغییرات pH
Fig 2. The results of pH changes

روند تغییرات مشخصات بیوگاز و درصد متان تولیدی

یکی از مهمترین خروجی‌های مدل که معمولاً از اهداف اصلی مدل‌سازی است، نتایج پیش‌بینی بیوگازهای تولیدی است. در واقع، پیش‌بینی عملکرد هاضم از جهت میزان گاز و درصد متان تولیدی در شرایط بارگذاری‌های مختلف حائز اهمیت است. نتایج تغییرات بیوگاز، در شکل ۳، ۴ و ۵ و جدول ۵ و ۶ آورده شده است.

تعیین مقدار باقی‌مانده آن، COD محاسبه می‌شود (Jalali et al, 2021). اهمیت COD از آن جایی است که او احاد مدل به کار رفته براساس آن بوده و هم چنین اهمیت COD در تجزیه سوبسترا غیرقابل انکار است. مشخصات پسماند گاوی استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری مواد جامد کل، رطوبت، مواد جامد فرار و خاکستر در جدول و مشخصات مربوط به COD در جدول ۳ ارائه شده اند.

جدول ۲- مشخصات پسماند گاوی

درصد مواد جامد فرار (vs)	درصد مواد جامد رطوبت (M)	درصد مواد جامد (TS)	نسبت ترکیب با آب (وزنی) Water: manure
18.35	81.65	90.31	1:1

جدول ۳- مشخصات COD و جرم مخصوص
Table 3. COD specifications and specific gravity

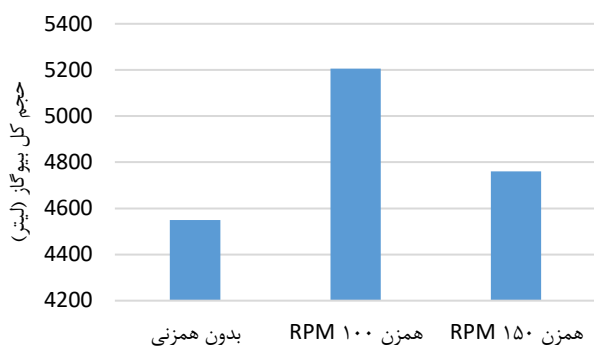
جرم مخصوص (kg/m ³)	CO D	درصد خاک ستر (ash)	درصد مواد جامد فرار (VS)	درصد مواد جامد رطوبت (M)	درصد مواد جامد (TS)	نسبت ترکیب با آب (وزنی) Water: manure	نمونه
1083	9.8	17.06	82.94	91.68	8.32	1:1	پسماند گاوی Cow manure

نتایج و بحث

نتایج در این تحقیق، پایلوت آزمایشگاهی از راکتور هضم بی‌هواری با ورودی پسماندهای دامی، با استفاده از ADM1 مدل شده است. سپس با استفاده از مفهوم آنترپی، پارامترهای حساس تعیین و با معادلات دینامیکی بهینه شده‌اند. در این فصل نتایج و اطلاعات هر بخش به تفصیل ارائه می‌شود.

جدول ۴- مشخصات بارگذاری پسماند

میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min	پارامترهای مورد بررسی Parameter
6.44	7.1	6	pH
15.5	30	1	زمان Time
173.5	180	0	بیوگاز Biogas
58.6	79	0	متان Methane



شکل ۵- نمودار کل حجم بیوگاز

Fig 5. Diagram of the total volume of biogas

با استفاده از مقادیر داده‌های تجربی آزمایشگاه و داده‌های تولید شده مدل ADM1، می‌توان مقدار ضریب تعیین (R^2) را نیز به دست آورد نمودار همبستگی میان داده‌ها را نشان می‌دهد. ضریب تعیین برای این شبکه برابر ۰/۹۹۶۷ می‌باشد. پس می‌توان گفت دقت این شبکه تقریباً ۹۹/۶ درصد می‌باشد.

جدول ۶- مشخصات پسماند ورودی به هاضم در بارگذاری‌های مختلف

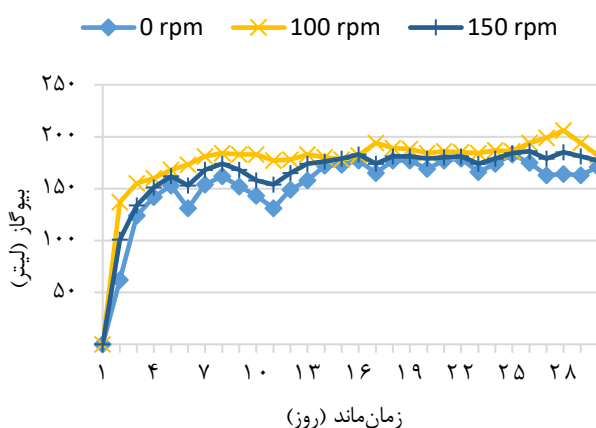
Table 6. Characteristics of waste loading the digester in different loads

زمان کل (روز) Total Day	دور همزنی RPM	دما (درجه سلسیوس) Temp (C)	همزن / زمان Mixer/Time	مراحل بارگذاری load
30	0	35	بدون همزن With out mixing	اول First
30	100	35	با همزن ۶ ساعت دور هم زنی 6 hour	دوم Second
30	150	35	با همزن ۱۲ ساعت دور هم زنی 12 hour	سوم Third

برای تحلیل و برآورد ورودی‌های مورد نیاز برای هر ۳ بارگذاری، محاسبات انجام شده و سپس مدل در نرم‌افزار فلوئنت اجرا شد. خروجی‌های این تحلیل که در واقع ورودی‌های مدل ADM1 هستند، برای هر ۳ بارگذاری ذکر شده است.

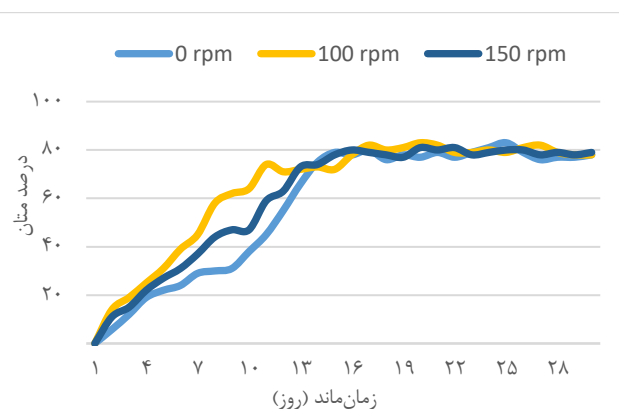
نتایج اجرای مدل ADM1

مدل ADM1 با استفاده از ورودی‌ها و در شرایط مزوفیلیک و با خوراک دهی، اجرا شد. در واقع، هاضم بی‌هواری به حجم مفید، با خوراک دهی روزانه به مدت ۵ دقیقه و حجم ورودی و خروجی ۲/۵ لیتر در روز شبیه‌سازی گشت.



شکل ۳- نتایج تغییرات بیوگاز (لیتر)

Fig 3. The results of biogas changes (liters)



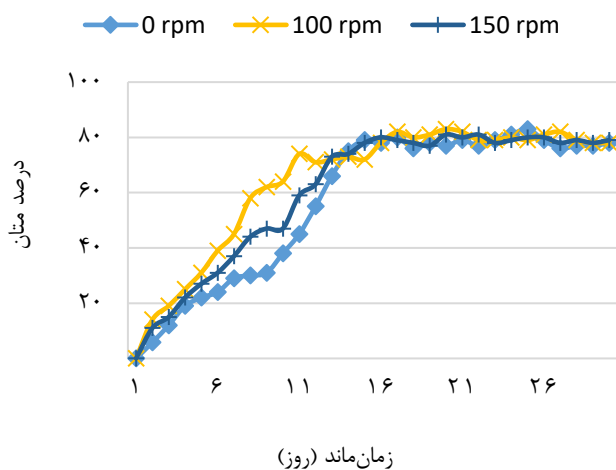
شکل ۴- نتایج تغییرات درصد متان

Fig 4. The results of methane percentage changes

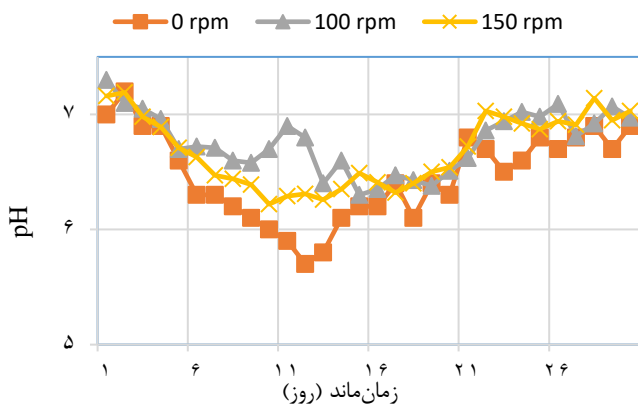
جدول ۵- عملکرد هاضم در هر تیمار

Table 5. Digester performance in each treatment

ردیف No	سرعت همزنی (دور در دقیقه) RPM	دمای مخزن (سلسیوس) Temp (C)	حجم کل بیوگاز تولید شده (لیتر) Total Volume (lit)	حجم کل متان تولید شده (لیتر) Total Volume (lit)
1	0	35	4550	2783
2	100	35	5205	3422
3	150	35	4761	2998



شکل ۷- نتایج تغییرات درصد متان در مدل ADM1
Fig 7. Results of changes in methane percentage in the ADM1 model



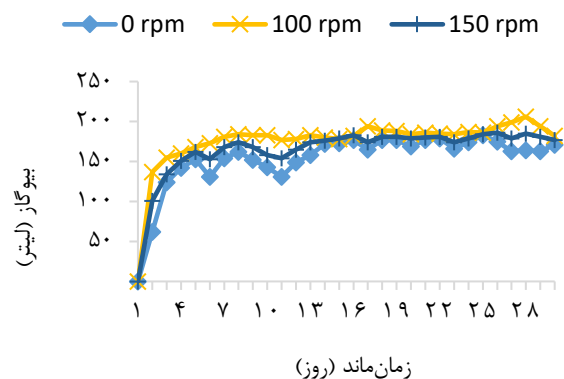
شکل ۸- نتایج تغییرات pH در مدل ADM1
Fig 8. Results of pH changes in ADM1 model

با توجه به نمودار شکل ۸ تغییرات pH و قلیائیت سیستم، تقریباً روند مشابهی دارند. علاوه بر آن، با استفاده از این نمودار، در طول دوره بهره‌برداری، pH بین حدود ۵/۷ تا ۷/۳ برآورد شده است. بنابراین، اگرچه در این دوره pH به عنوان عامل بازدارنده ایفای نقش نکرده است و روابط آن، به عنوان عامل بازدارنده، در مدل اجرا نشده است؛ با این حال، تغییرات آن در تولید بیوگاز تأثیرگذار بوده است. در دو بارگذاری اول، به دلیل غالب بودن فعالیت میکروارگانیسم‌های اسیدساز، مقدار pH کاهش می‌یابد و در روز ۳۰ کاهش می‌یابد که در نمودار تولید بیوگاز و متان نیز افت تولید قابل مشاهده است. با توجه به این که میزان pH بر تولید بیوگاز تأثیر زیادی دارد و بهترین محدوده آن بین ۶/۴ تا ۷/۳ است، به دلیل تغییرات سریع pH در این محدوده و همچنین کنترل آن در تمام ترکیبات، تأثیر چشم‌گیر و معنی‌داری روی حجم و فشار بیوگاز نداشته است. این بدین معنی است که با کنترل pH در محدوده مذکور، شاهد بیشترین فعالیت باکتری‌های متان‌ساز برای تولید گاز هستیم.

طبق نمودار شکل ۶، تولید گاز از روز ۱۵ به بعد به طور تقریبی ثابت شده و به مقدار ۸۰ درصد متان می‌رسد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، معمولاً تولید بیوگاز در روزهای با افزایش بارگذاری کاهش می‌یابد؛ در هر تغییر بار آلی ورودی، بیشترین میزان خوراک تازه هضم نشده به سیستم وارد می‌شود، بنابراین مراحل هضم با تخریب سلولی و هیدرولیز شروع می‌شوند. این مراحل اغلب زمان‌بر هستند و علاوه بر آن، محصولات تولیدی مرحله هیدرولیز اسیدی هستند. بنابراین، انتظار می‌رود که فعالیت میکروارگانیسم‌های تولید بیوگاز با اسیدی شدن محیط کاهش یابد.

Zhai et al (2018) هاضمی را در یک آزمایشگاه پیلوت به حجم یک متر مکعب با یک پروانه بالا محور و با سه سرعت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ دور در دقیقه به صورت متناوب یک بار در روز به مدت ۵ دقیقه در شرایط مزوفیلیک (دمای ۳۵ درجه سلسیوس) و مدت زمان ۳۰ روز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت اختلاط ۱۰۰ دور در دقیقه بهتر از ۵۰ و ۱۵۰ دور در دقیقه است، که نشان می‌دهد حداقل سرعت اختلاط وجود دارد و بهبود بیشتر از آن بر تولید متان تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین، نتایج دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با آزمایشات هم‌سو بود و نشان داد که سرعت اختلاط ۱۰۰ دور در دقیقه برای همگن‌سازی محتوای هاضم کافی است. علاوه بر این، از CFD برای پیش‌بینی زمان اختلاط در هاضم استفاده شد.

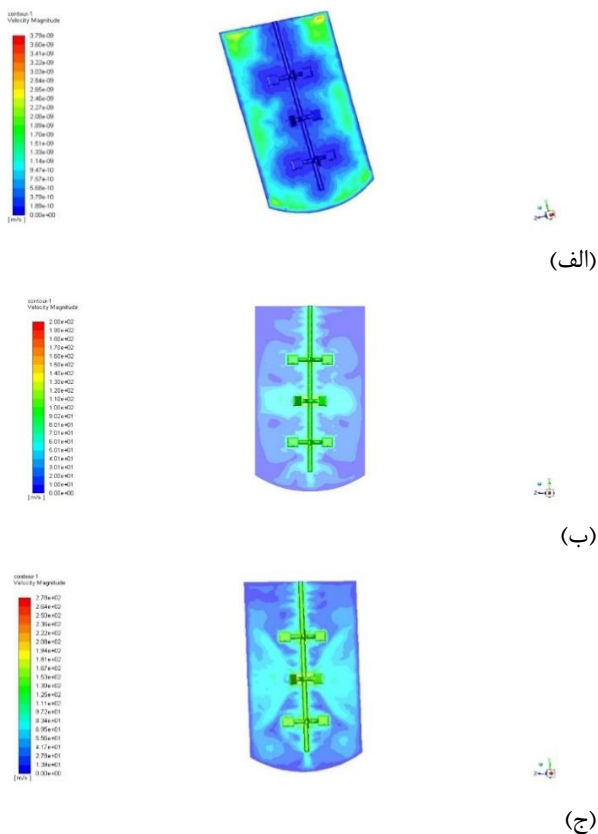
با توجه به نمودار شکل ۷ شدت اختلاط در روزهای ابتدایی به وضوح قابل مشاهده است، و شدت هم‌زنی ۱۰۰ دور در دقیقه بهتر از ۱۵۰ دور دقیقه و همین‌طور شدت اختلاط ۱۵۰ دور در دقیقه بهتر از بدون هم‌زنی است. همانطور که در فصل دوم اشاره شد شدت اختلاط برای تولید بیوگاز و متان از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال شدت بیش از حد تأثیر منفی بر تولید بیوگاز دارد. که این یافته‌ها هم‌سو با اظهارات دانشمندان و محققان مبنی بر اثر سرعت هم‌زنی است. همچنین بیشترین میانگین درصد متان تولیدی، ۶۴ درصد است که در بارگذاری دوم (۱۰۰ rpm) اتفاق افتاده است.



شکل ۶- نتایج تغییرات بیوگاز (لیتر) در مدل ADM1
Fig 6. The results of biogas changes (liters) in the ADM1 model

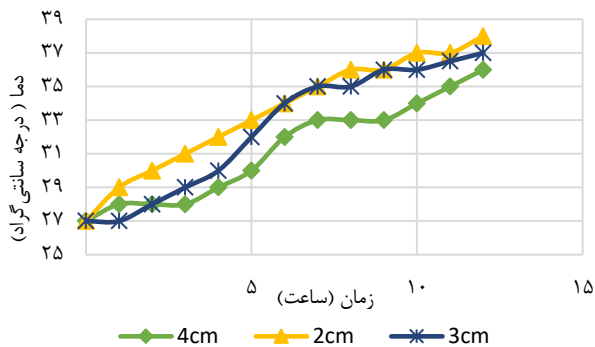
روند تغییرات مشخصات دما

با توجه به شکل ۹، دیده می‌شود که در دورانی که سرعت هاضم برابر با ۱۰۰ دور در دقیقه است، توزیع دما در سراسر هاضم نسبت به سرعت‌های همزنی دیگر به طور یکنواخت‌تری اتفاق می‌افتد. این نکته مشخص می‌کند که در سرعت همزنی ۱۰۰ دور در دقیقه، دما در تمام فضای هاضم به طور یکنواختی توزیع شده است. این به این معنی است که در این سرعت همزنی، تغییرات دما بین مختصات مختلف هاضم کمتر است و دمای هاضم به طور یکنواختی از بالا تا پایین تغییر می‌کند. به طور کلی، این مشاهده نشان می‌دهد که در سرعت همزنی ۱۰۰ دور در دقیقه، توزیع یکنواخت دما در هاضم بهبود یافته است و ممکن است در نتیجه تغییر سرعت همزنی، بهره‌وری و عملکرد فرایند هضم بیوگاز نیز تحت تأثیر قرار گیرد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴، نمودارهای کانتور و بردار سرعت و نمودار کانتور دما برای سرعت‌های مختلف همزنی نشان داده شده است.



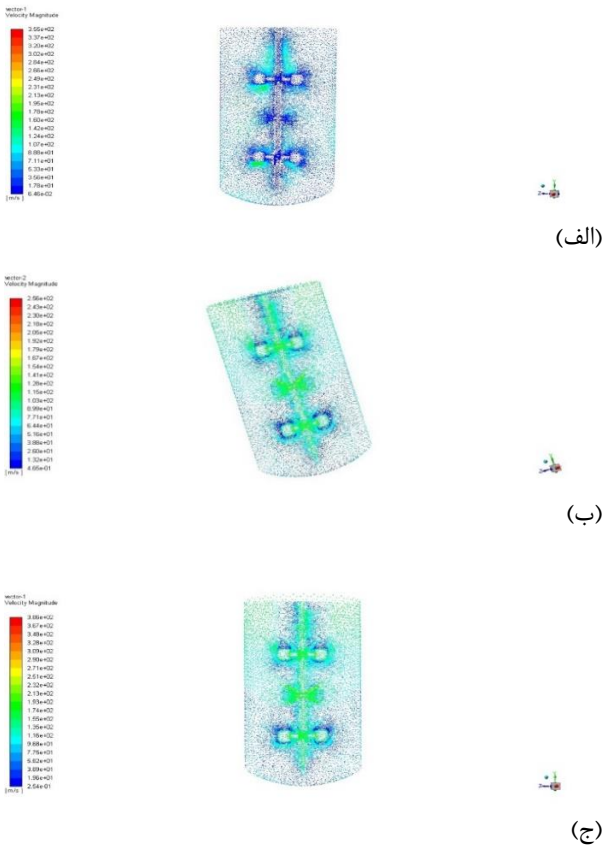
شکل ۱۰- کانتور سرعت در مقطع طولی در سرعت‌های همزنی؛ (الف) ۰، (ب) ۱۰۰ و (ج) ۱۵۰ دور در دقیقه

Fig 10. Velocity contour in longitudinal section at stirrer speeds; a) 0, b) 100 and c) 150 rpm



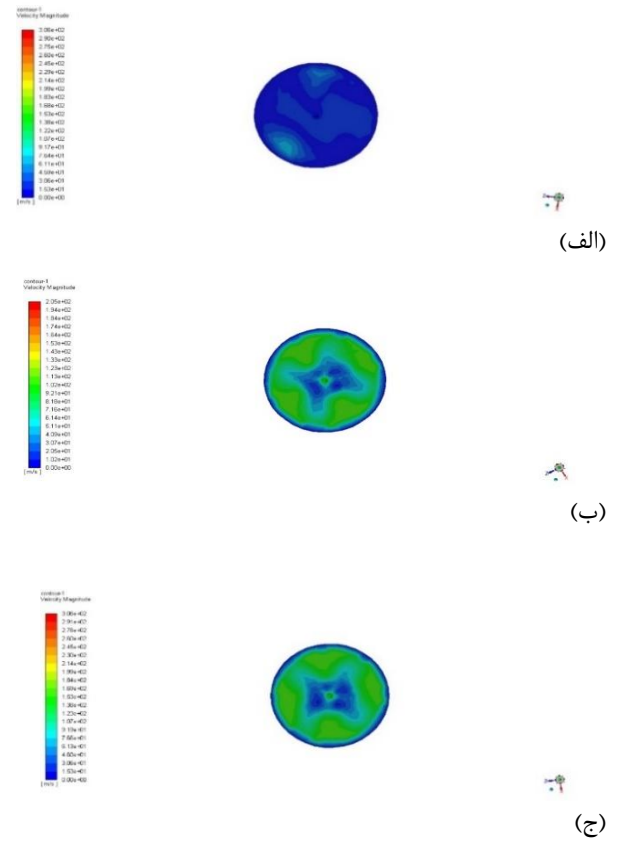
شکل ۹- میانگین تغییرات دما در شبیه‌سازی در دورهای مختلف همزنی

Fig 9. The average temperature changes in the simulation in different rounds of mixing



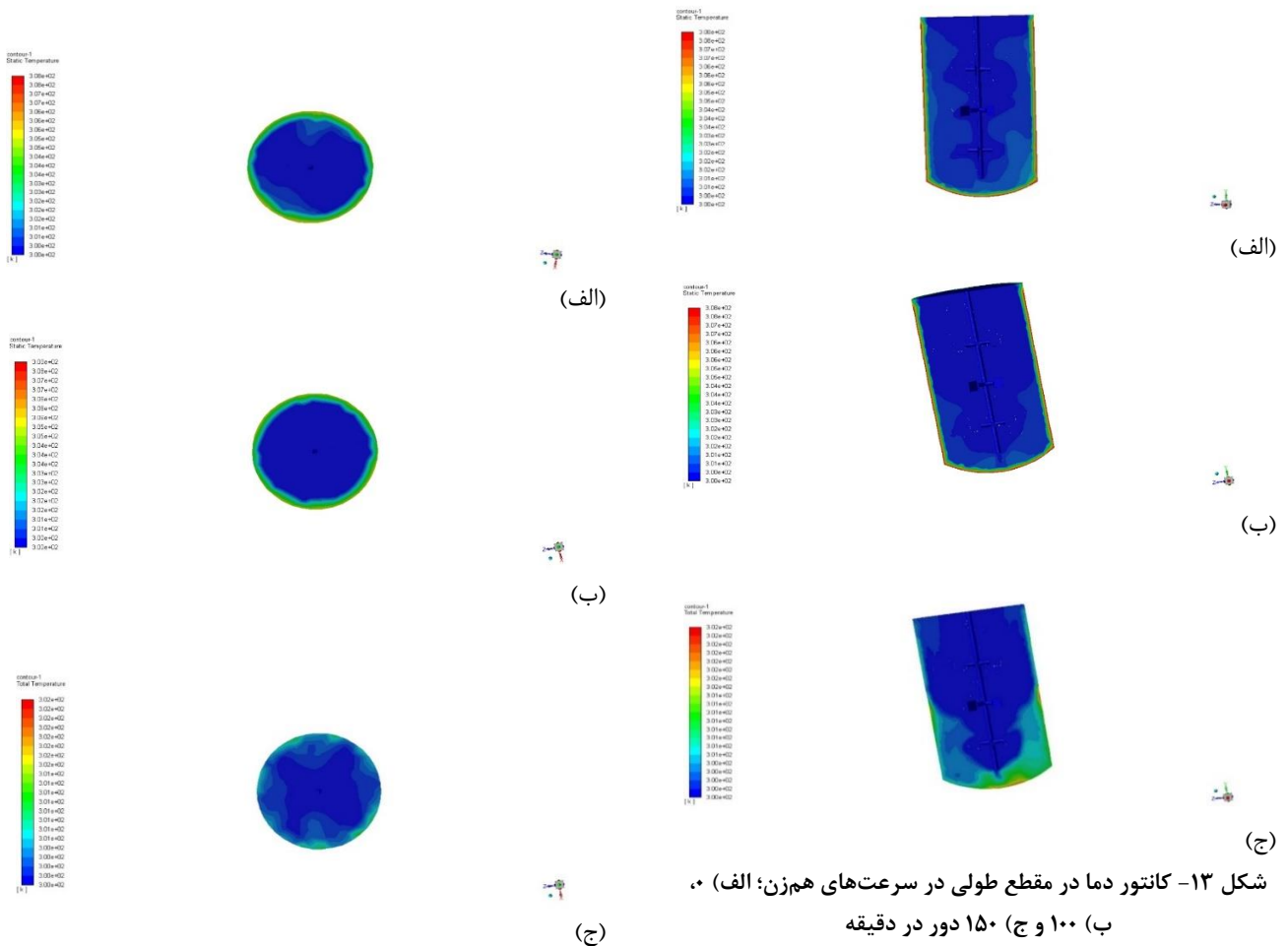
شکل ۱۲- بردار سرعت در سرعت‌های هم‌زن: الف) ۰، ب) ۱۰۰ و ج) ۱۵۰ دور در دقیقه

Fig 12. Velocity vector at mixer speeds; a) 0, b) 100 and c) 150 rpm



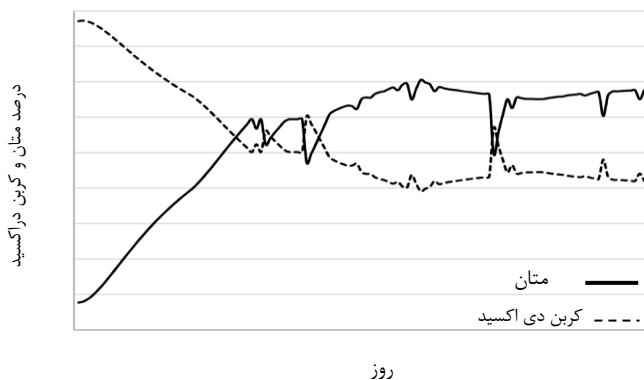
شکل ۱۱- کانتور سرعت در مقطع عرضی در سرعت‌های هم‌زن: الف) ۰، ب) ۱۰۰ و ج) ۱۵۰ دور در دقیقه

Fig 11. Speed contour in cross-section at stirrer speeds; a) 0, b) 100 and c) 150 rpm



شکل ۱۳- کانتور دما در مقطع طولی در سرعت‌های همزن؛ الف) ۰، ب) ۱۰۰ و ج) ۱۵۰ دور در دقیقه
 Fig 13. Temperature contour in longitudinal section at stirring speeds; a) 0, b) 100 and c) 150 rpm

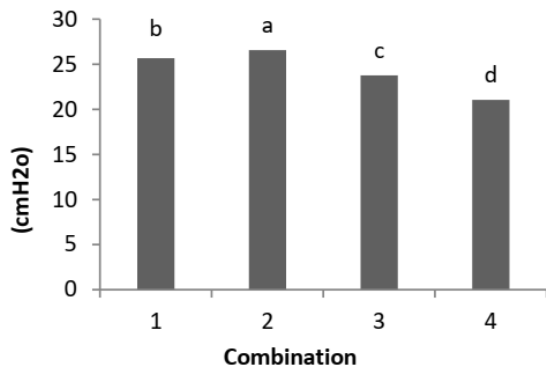
شکل ۱۴- کانتور دما در مقطع عرضی در سرعت‌های همزن؛ الف) ۰، ب) ۱۰۰ و ج) ۱۵۰ دور در دقیقه
 Fig 14. Temperature contour in cross section at stirrer speeds; a) 0, b) 100 and c) 150 rpm



شکل ۱۵- مقایسه نحوه تغییرات درصد متان و کربن‌دی‌اکسید تولیدی

Fig 15. Comparison of the changes in the percentage of methane and carbon dioxide produced.

با توجه به شکل ۱۵ درصد گاز متان و کربن‌دی‌اکسید از بیوگاز تولیدی، کاملاً روند خلاف هم دارند.

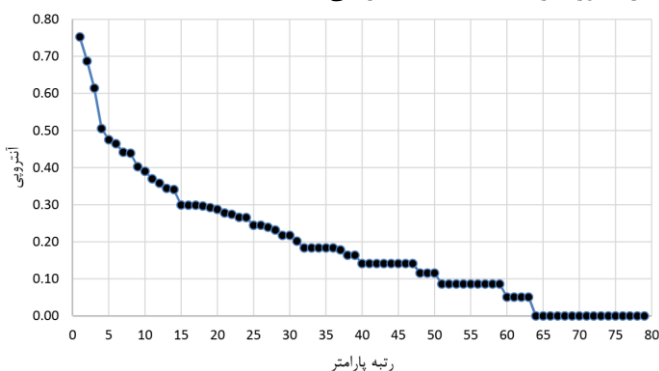


شکل ۱۷- بررسی یکنواختی در بیوگاز تولیدی

Fig 17. Examination of uniformity in biogas production

آنالیز حساسیت

برای بررسی حساسیت تولید متان به تغییرات دینامیکی پارامترها، از مفهوم آنترپی استفاده شد. همانطور که در فصل سوم اشاره شد، چنانچه از بین چند متغیر لازم باشد که تعدادی انتخاب شوند، گزینش متغیرهایی که آنترپی بالاتری داشته باشند، معقول می‌باشد. در رابطه آنترپی گسسته، برای محاسبه تابع احتمال برای هر پارامتر از متد ارائه شده توسط سینگ استفاده شده است. در این روش هر دسته‌ی اطلاعات، به زیربازه‌هایی تقسیم می‌شود و فراوانی هر زیربازه تعیین و احتمال این فراوانی محاسبه می‌شود. به این ترتیب برای پارامترهای مورد بررسی پس از نرمال‌سازی داده‌ها در هر دسته، آنترپی به روشی که توضیح داده شد و با در نظر گرفتن ۱۰ زیربازه، محاسبه شد. شکل ۱۸ نتایج آنترپی محاسبه شده برای پارامترهای مدل بصورت رتبه‌بندی شده، نشان می‌دهد.

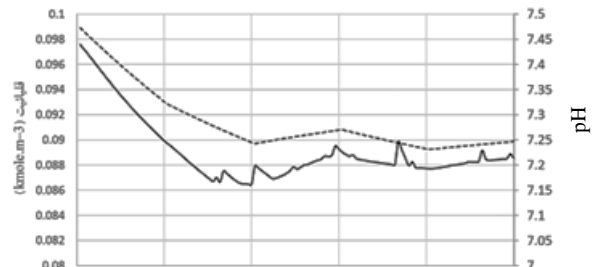


شکل ۱۸- آنترپی مدل ADM1

Fig 18. Entropy of ADM1 model

با توجه به تعداد زیربازه‌ی انتخابی، کران بالای آنترپی پارامترها در این مسئله ۱ و کران پائین آن ۰ است. با توجه به نمودار بدست آمده تفاوت آنترپی سه پارامتر با رتبه بالاتر با سایر پارامترها زیاد است. بنابراین، این ۳ پارامتر قطعاً تأثیر بیشتری در مدل خواهند داشت.

pH یکی از مهمترین پارامترهای محیطی است. بنابراین، با توجه به اهمیتی که میزان قلیائیت و pH سیستم در میزان تولید کل گاز و همچنین درصد بیوگازها دارد، تغییرات آنها در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶- قلیائیت و pH برآورد شده توسط مدل

Fig 16. Alkalinity and pH estimated by the model

pH در محدوده ۷/۱ تا ۷/۵ برآورد شده است. بنابراین اگرچه در این دوره pH به عنوان عامل بازدارنده ایفای نقش نکرده است و روابط آن، به عنوان عامل بازدارنده، در مدل لحاظ نشده است؛ با این حال، نقش آن در تولید بیوگاز را نمی‌توان کتمان کرد. در بارگذاری اول، به دلیل غالب بودن فعالیت میکروارگانیسم‌های اسیدساز مقدار pH کاهش می‌یابد و در روز ۳۰ کاهش می‌یابد، که در نمودار تولید بیوگاز و متان نیز افت تولید، قابل مشاهده است.

اثر زمان

بررسی اثر زمان روی حجم بیوگاز تولید شده از ترکیب کود گاوی مطابق جدول زمان در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی داری بر درصد حجم گاز داشت. این بدین معنی است که با افزایش زمان، مقدار حجم گاز تولید شده در دمای ثابت ۳۷ درجه سلسیوس هم روند افزایشی داشت. بعد از تکمیل دوره بارگذاری، روند تولید گاز به علت کاهش مواد مغذی که در دسترس باکتری‌های متان‌ساز بود کاهش یافت. بیشترین گاز تولید شده که مقدار آن ۰/۴۲۲ متر مکعب بود، و کمترین گاز تولید شده که مقدار آن ۰/۰۴۶ بود، در زمان اول به دست آمد.

بررسی اثر یکنواختی بیوگاز تولید شده از ترکیب کود با توجه به نتایج به دست آمده که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، درصد ترکیبات در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی داری بر میزان فشار گاز داشت.

نتیجه‌گیری کلی

با گسترش جوامع و افزایش صنایع، تأمین انرژی از مهمترین چالش‌های دنیای کنونی محسوب می‌شود. هدف از بکارگیری روش‌هایی چون هضم بی‌هوازی، علاوه بر حل معضلاتی که پسماندهای آلی تر در دفن ایجاد می‌کنند، بهره‌گیری مناسب از گاز متان تولید شده و دستیابی به انرژی است.

با توجه به این مسئله، استفاده از این مدل برای کود دامی جامد که درصد هر سه جزء در آن‌ها قابل توجه است، انتخاب مناسبی است. با توجه به پیچیدگی فرآیند و توسعه مدل ADM1 برای ورودی، مطالعات در زمینه بکارگیری مدل برای سایر کودها و همچنین در شرایط محلی خاص، همچنان در حال انجام است. هدف این پژوهش نیز، مدل‌سازی بیوگاز تولیدی (با تأکید بر تولید گاز متان) از پسماندهای جامد دامی بوده است.

جهت نیل به هدف فوق، راکتوری که در تحقیق قبلی به صورت آزمایشگاهی برای بهره‌برداری شده بود، مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصه‌های اندازه‌گیری شده در ورودی‌های مدل ADM1 تبدیل شد. سپس مقادیر اولیه که در مرحله راه اندازی هاضم گزارش شده بود و همچنین مقادیر پیش فرض در مدل، برآورد شد. مدل برای مدت ۳۰ روز اجرا و نتایج و خروجی‌های مدل از روز ۱۵ام به بعد به عبارتی در طول مدت بهره‌برداری از هاضم، نمایش داده شد. پس از رسیدن به نتایج نسبتاً مورد قبول از تولید بیوگازها در هاضم، با شرایط پروژه مورد مطالعه، آنالیز حساسیت برای تعیین پارامترهای تأثیرگذارتر بر مدل، مورد مطالعه قرار گرفت.

در این مطالعه، برای نخستین بار از مفهوم آنتروپی برای تعیین پارامترهای حساس مدل ADM1 استفاده شد. مدل به پارامترهایی که آنتروپی بالاتری دارند و به عبارتی، بینظمی بیشتری در مدل ایجاد می‌کنند، حساس‌تر است. با این توضیح، ۳ پارامتر با رتبه آنتروپی بالاتر برای کالیبراسیون انتخاب شدند.

نتایج کلی حاصل از این مطالعه، به صورت موارد زیر قابل بیان است:

- مدل ADM1 به عنوان مدلی مناسب در هضم بی‌هوازی پسماندهای جامد آلی مورد مطالعه، شناخته شد. نتایج این مدل، به طور کلی از نظر تئوری قابل استدلال و منطبق بر درک فیزیکی از سیستم بود.

- برآورد پارامترهای ورودی ADM1 با متد آنالیز ارائه شده است، نتایج مورد قبولی داشته است.

- شاخص آماری آنتروپی، با توجه به آن که غیرخطی و مبتنی بر اطلاعات است، عملکرد موفقی در تعیین پارامترهای حساس مدل داشته است.

ضرایب محدودکننده‌های pH بیشترین تأثیر را در تولید متان از خود نشان دادند، که یکی از مهمترین پارامترها برای کالیبراسیون در جهت افزایش دقت برآورد متان تولیدی مدل محسوب می‌شوند.

- بیوگاز تولیدی با افزایش بارگذاری سیستم لزوماً روند افزایشی نخواهد داشت. در شبیه‌سازی راکتور پسماند، بیوگاز تولیدی در بارگذاری‌های بعدی با وجود افزایش بارگذاری آلی، افزایش نیافت.

- تغییرات ناگهانی در تولید عوامل محدودکننده تولید بیوگاز، مانند آمونیاک، باعث افت شدید در تولید بیوگاز، خصوصاً گاز متان میشود.

- روند تولید بیوگاز، مطابق با روند تغییرات متان و کربن‌دی‌اکسید در هاضم است.

- کاهش قلیانیت می‌تواند موجب کاهش pH سیستم شود و روند کلی تغییرات این دو پارامتر مشابه است.

- روند تغییرات درصد تولید گاز کربن‌دی‌اکسید و گاز متان، خلاف یکدیگر است. در واقع، در بارگذاری‌هایی که دی‌اکسیدکربن بیشتری تولید شود، درصد متان تولیدی کمتر خواهد بود و برعکس.

- در محدوده‌ی pH تنظیم شده در هاضم آزمایشگاه و به تبع آن مدل، مقدار گاز تولیدی در مقایسه با گاز متان، ناچیز است.

منابع

- Arzate Salgado, J. A. (2019). *Modeling and simulation of biogas production based on anaerobic digestion of energy crops and manure*. (Thesis)
- Beiki, H. and Jananeh, E., 2019. *Simulation of Methane Production Process from Livestock Wastes into a Batch Bioreactor*. Journal of Environmental Science and Technology, 21(8), pp.147-158. <https://doi.org/10.22034/jest.2019.11126>
- Aworanti, O. A., Agarry, S. E., Arinkoola, O. A., & Adeniyi, V. (2011). *Mathematical modeling for the conversion of animal waste to methane on batch bioreactor*. Int. Journal of Engineering Sc. and Tech, 3(1).
- Baltrėnas, P., Kolodinskij, V., Zagorskis, A., & Baltrėnaitė, E. (2018). *Research and analysis of biogas produced from sewage sludge using a batch bioreactor*. Environmental technology, 39(23), 3104-3112. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1375018>
- Beiki, H., & Jananeh, E. (2019). *Simulation of Methane Production Process from Livestock Wastes into a Batch Bioreactor*. Journal of Environmental Science and Technology, 21(8), 147-158. <https://doi.org/10.22034/jest.2019.11126>
- Daneshvari, S., Salatin, P. and Khalilzadeh, M., 2020. *Impact of renewable energies on green economy*. Journal of Environmental Science

- Sustainable Energy Reviews, 40, 1030-1047.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.182>
- Mao, L., Zhang, J., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2019). *Effects of mixing time on methane production from anaerobic co-digestion of food waste and chicken manure: Experimental studies and CFD analysis*. *Bioresource Technology*, 294, 122177.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122177>
- Norouzi, N., & Khajepour, H. (2021). *Simulation of methane gas production process from animal waste in a discontinuous bioreactor*. *Biointerface research in applied chemistry*, 11, 13850-13859.
<https://doi.org/10.33263/BRIAC116.1385013859>
- Pletcher, R. H., Tannehill, J. C., & Anderson, D. (2012). *Computational fluid mechanics and heat transfer*. CRC Press Syaichurrozi, I., Basyir, M. F., Farraz, R. M., & Rusdi, R. (2020). A preliminary study: Effect of initial pH and *Saccharomyces cerevisiae* addition on biogas production from acid-pretreated *Salvinia molesta* and kinetics. *Energy*, 207, 118226
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.12.006>
- Show, K.Y., Lee, D.J. and Pan, X., 2013. *Simultaneous biological removal of nitrogen-sulfur-carbon: recent advances and challenges*. *Biotechnology advances*, 31(4), pp.409-420.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.12.006>
- Zhai, X., Kariyama, I. D., & Wu, B. (2018). *Investigation of the effect of intermittent minimal mixing intensity on methane production during anaerobic digestion of dairy manure*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 121-129.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.002>
- Zhou, H., Löffler, D., & Kranert, M. (2011). *Model-based predictions of anaerobic digestion of agricultural substrates for biogas production*. *Bioresource Technology*, 102(23), 10819-10828.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.014>
- and Technology, 21(12), pp.165-179. (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/jest.2019.39749.4466>
- Drapcho, C.M., Nhuan, N.P. and Walker, T.H., 2008. *Biofuels engineering process technology* (No. Sirsi) i9780071487498). New York: McGraw-Hill.
- Ghaemi, F., & Sadeghi, H. (2013). *The potential of biogas production from animal waste in Iran*, the 4th Iran Bioenergy Conference. (biomas & biogas), Tehran. (In Persian).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.021>
- Grieder, C., Mittweg, G., Dhillon, B.S., Montes, J.M., Orsini, E. and Melchinger, A.E., 2012. *Kinetics of methane fermentation yield in biogas reactors: Genetic variation and association with chemical composition in maize*. *Biomass and bioenergy*, 37, pp.132-141.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.020>
- Jalali, A., Abdi, R., Abdollah Por, Sh., Ranjbar, F., (2021). *Fermentation chamber design and discontinuous anaerobic digester construction for biomethane production*. *Research on the mechanics of agricultural machines*, 10(3), pp.43-54 (In Persian).
- Hoshyar, A. (2011). *Basics of bioenergy*. Nesoh Publishers.
- Hua, Y., Oliphant, M., & Hu, E. J. (2016). *Development of renewable energy in Australia and China: A comparison of policies and status*. *Renewable Energy*, 85, 1044-1051.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.060>
- Hughes, L., & Rudolph, J. (2011). *Future world oil production: growth, plateau, or peak?* *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(4), 225-234.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2011.05.001>
- Li, C. H., Wang, B., Ye, C., & Ba, Y. X. (2014). *The release of nitrogen and phosphorus during the decomposition process of submerged macrophyte (Hydrilla verticillata Royle) with different biomass levels*. *Ecological engineering*, 70, 268-274.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.011>
- Lindmark, J., Thorin, E., Fdhila, R. B., & Dahlquist, E. (2014). *Effects of mixing on the result of anaerobic digestion*. *Renewable and*