نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۳، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صفحه ۸۳ – ۶۱

مدل سازی و حذف گاز آلاینده سولفید هیدروژن از بیوگاز تولیدی هاضم بی هوازی کود مرغی و پسماند غذایی در راکتور ناپیوسته

[۱] کاوه کلانترهرمزی، [۲] مجتبی معصومی*

تاریخ دریافت:
۱۳۹۹ / ۸ / ۲۰

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۹ / ۹ / ۲۰

کلمات کلیدی:
بیوگاز، هضم بی¬هوازی، کود مرغ، پسماند آشپزخانه، سولفید هیدروژن، مدل سازی .

چکیده

جهت تامین انرژی های تجدید پذیر و همچنین کاهش گازهای گلخانه ای می‌توان از هضم بی‌هوازی برای تبدیل پسماندهای آلی به انرژی استفاده نمود. طی فرایند هضم بی هوازی، بیوگاز تولید شده و از آن می توان برای گرمایش و تولید برق استفاده کرد. بیوگاز تولید شده به غیر از متان گازهای دیگری هم به همراه دارد که مخرب ترین آنها گاز سولفید هیدروژن بوده که در صورت عدم حذف آن باعث خورندگی و صدمه به تاسیسات میگردد. در این تحقیق جهت تولید انرژی به شکل بیوگاز قابل اشتعال، از ترکیب های مختلف پسماند آشپزخانه و کود مرغی جهت بهینه سازی و افزایش میزان بیوگاز با توجه به ترکیبات مواد آلی موجود استفاده گردید که نتایج نشان داد بهترین ترکیب کود مرغی و پسماند آشپزخانه با نسبت برابر بوده و در ادامه با جذب گاز سولفید هیدروژن با مواد جاذب (سنگ آهن) کاهش تولید ناخالصی‌ها در گاز مورد بررسی قرار گرفت که نشان از حذف این گاز در بازه زمانی متفاوت نسبت به گاز تولیدی می باشد. در این تحقیق سه مدل گومپرتز اصلاح شده، لجستیک اصلاح شده و مدل بدون فاز تأخیر مورد بررسی قرار گرفته شدند تا مشخص شود کدام مدل بهترین تولید بیوگاز را پیش‌بینی می‌کند. دو مدل اول یعنی گومپرتز و لجستیک اصلاح شده با دقت خوبی برروی اطلاعات منطبق شدند اما مدل No-lag بدلیل درنظر نگرفتن فاز تأخیر در تولید بیوگاز مقداری خطا را نشان میدهد. با توجه به نتایج هاضم های مختلف، نتایج نشان میدهد که پتانسیل تولید بیوگاز برای نسبت (KW+CM) با مقدار ۱۱۰۰۰ میلی لیتر از سایر موارد به دلیل ترکیب مناسب پسماندها بیشتر می باشد.

۱. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی شیمی،دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت اله آملی (نویسنده مسئول)
kave.kalantar@gmail.cm
۲. استادیار گروه مهندسی شیمی،دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت اله آملی mojtabamasoumi95@yahoo.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

مقدمه

امروزه زباله‌های مواد غذایی (FW[1])، یکی از زباله‌های زیستی در سراسر جهان است که در مقیاس بزرگ تولید می‌شود(پانیگ[2] رهی ۲۰۲۰). درصد قابل توجهی از زباله‌های مواد غذایی دفع و یا سوزانده می‌شود، بنابراین اثرات نامطلوبی همچون انتشار گازهای گلخانه‌ای را به دنبال دارد. در حالی که بهترین گزینه، استفاده مجدد از آن برای تولید انرژی می باشد. (آ.گالیپولی[3] و همکاران۲۰۲۰).

در سطح جهانی، از هضم بی‌هوازی (AD[4]) برای تبدیل پسماندهای آلی به بیوگاز (انرژی تجدید پذیر) استفاده می‌شود. این فناوری دارای پتانسیل تجاری قابل توجهی می باشد که با پیشرفت تکنولوژی، باعث افزایش بازیابی انرژی به سطوح رقابتی با سوخت فسیلی می‌شود(وسترهولم[5] و همکاران۲۰۲۰).

بیوگاز عمدتاً از سه جز شیمیایی شامل متان، دی اکسید کربن و نیتروژن تشکیل شده و به همراه آن مقادیر اندک دیگری شامل هیدروژن سولفید، هیدروژن، آمونیاک، اکسیژن و منوکسید کربن وجود دارد. علاوه بر این، بیوگاز با آب، ذرات گرد و غبار، سیلوکسان‌ها، ترکیبات معطر و هالوژنه اشباع شده همراه است. منابع مختلف بیوگاز با سطح ناخالصی آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است(خان[6] و همکاران۲۰۱۷).

1 Food Waste
2 Panigrahi
3 A.Gallipoli
4 Anaerobic Digestion
5 Westerholm
6 Khan

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

جدول ۱. نسبت ترکیبات تشکیل دهنده بیوگاز با منابع مختلف

بیوگاز	متان	کربن دی اکسید	نیتروزن	اکسیزن	هیدروزن سولفید (PPM)
دفن زباله‌ها	۴۰٪-۶۰٪	۲۴٪-۴۰٪	۱٪-۱۷٪	۱٪-۲٪/۶	۴۲۷-۱۵
فاضلاب	۶۵٪-۵۸٪	۳۳٪-۴۰٪	۱٪-۸٪	کمتر از ٪۱	۲۴-۰
ترکیبات آلی	۶۰٪-۷۰٪	۳۰٪-۴۰٪	۱٪	۱٪-۵٪	۱۸۰-۱۰

سولفید هیدروژن به همراه سایر ترکیبات گوگردی (مرکاپتان و غیره)، رایج‌ترین آلاینده‌های بیوگاز هستند و مقدار آن‌ها، که می‌تواند از ppm/min ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متغیر باشد، تا حد زیادی به ترکیب ماده آلی بکاررفته در هضم بی‌هوازی بستگی دارد. ترکیبات گوگردی باید قبل از هرگونه استفاده از بین بروند زیرا در هنگام تماس با لوله‌ها، پمپ‌ها و موتورها بسیار خورنده هستند و بخاطر تبدیل آن‌ها به دی-اکسیدگوگرد (SO_2) و اسید سولفوریک (H_2SO_4) اثرات منفی بر محیطزیست می‌گذارند (اوکارا و همکاران[1] ۲۰۱۹) . روش‌های بکار رفته برای حذف هیدروژن سولفید عبارتند از: جذب با آب، افزودن کلرید آهن به بیو راکتور هضم کننده، جذب بر روی کربن فعال، روش بیولوژیکی، جذب شیمیایی با اکسید آهن و فرآیندهای غشایی می باشد.

یکی از روش‌های حذف هیدروژن سولفید استفاده از جاذب‌های مبتنی بر اکسید آهن است. در این فرآیند هیدروژن سولفید طبق واکنش زیر با اکسید آهن (Fe_2O_3) و هیدروکسید آهن ($Fe(OH)_3$) واکنش می‌دهد و در نتیجه به FeS غیر قابل انحلال تبدیل می‌شود(اوه[2] و همکاران ۲۰۱۷)

$$Fe_2O_3 + 3H_2S \longrightarrow Fe_2S_3 + 3H_2O$$

$$Fe(OH)_3 + 3H_2S \longrightarrow Fe_2S_3 + H_2O$$

از مزایای این روش حذف، بازده بالا و هزینه عملیاتی نسبتاً کم آن است.

1 Okoro
2 Awe

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

این تحقیق به دنبال یافتن این موضوع است که چگونه ضمن بهره گیری از یک ترکیب مناسب جهت افزایش تولید بیوگاز از پسماند آشپزخانه به عنوان یک پسماند دارای ترکیبات آلی فرایند حذف گاز سولفید هیدروژن آن را نیز مورد بررسی قرار دهد. در همین راستا ضمن بررسی پیشینه پژوهش های قبلی تولید بیوگاز از پسماند آشپزخانه، با آزمایش کود مرغی از آن به عنوان یک ترکیب مناسب با ترکیبات آلی موجود در پسماند آشپزخانه استفاده گردید و ضمن تهیه تجهیزات لازم، سیستم هاضم های بی هوازی نا پیوسته تکمیل و در دمای محیط مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. روند تولید بیوگاز و همچنین میزان تولید گاز آلاینده سولفید هیدروژن اندازهگیزی و فرایند حذف آن از طریق گردش پیوسته توسط کمپرسور و ستون جذب دارای سنگ آهن و براده های آن مورد بررسی قرار گرفته شد و در ادامه برازش داده های تجربی با مدل های متداول گومپرتز[1] و لجستیک[2] اصلاح شده و در انتها مدل بدون تاخیر فاز نیز ارائه شده است.

پیشینه پژوهش

داس[3] آ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه ای دیگر از پسماندهای آشپزخانه و فضولات گاو برای تولید بیوگاز و یک هضم‌کننده شناور برای تخمیر بی‌هوازی تحت شرایط مزوفیلیک استفاده شد. پس از انجام آزمایش، مقدار متان در بیوگاز تولیدی به حدود ۷۴٪ رسید(داس آ وهمکاران۲۰۲۰).

مانوچی[4] و همکاران (۲۰۱۸) با ترکیب پسماند مواد غذایی و لجن فاضلاب با استفاده از هضم بی هوازی فرایند تولید بیوگاز را بررسی کرده و پس از ۳۰ روز مشخص شد که هضم همزمان خوراک باعث کاهش جامدات فرار و COD[5] خوراک به میزان ۷۵٪ شده است. همچنین استفاده از ذرات گرانول هیکورا[6] به عنوان کاتالیست برای تولید بیوگاز باعث عدم تولید H_2S بعنوان یک گاز نامطلوب شد.

1 Gompertz
2 Logistic
3 Das
4 Manyuchi
5 Chemical oxygen demand
6 Hycura

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

تسنیم[1] و همکاران(۲۰۱۷)، تحت شرایط مزوفیلیک (۳۷درجه سلسیوس) دریافتند که می‌توان به میزان مناسبی از تولید بیوگاز برای استفاده خانگی و یا حتی صنعتی دست یافت. پسماند خانگی و فضولات گاو نیز ترکیب مناسبی برای تولید بیوگاز است اما ماندگاری کمی دارد. انتظار می‌رود که با ترکیب مناسب این فضولات و بهینه‌سازی شرایط به تولید بالاتری از بیوگاز دست یافت.

دنیه[2] و همکاران (۲۰۱۶) از هضم همزمان پسماند مواد غذایی و فضولات خوک برای تولید بیوگاز استفاده کردند و یک مدل درجه اول ترکیب شده را با یک مدل مرسوم درجه اول و مدل گمپرتز در انطباق داده‌های تجربی با یکدیگر مقایسه کردند. این مدل شامل پارامتر جدید نرخ مواد با تجزیه پذیری سریع به کل مواد تجزیه پذیر می‌باشد که برای بدست آوردن سینتیک از قسمت ناپایدار پسماند غذایی کاربرد دارد. این مدل برای نسبت‌های مختلف خوراک و برای یک خوراک با سرعت تخریب پذیری کم و زیاد زیست نتایج دقیقی از خود نشان داد.

ژای[3] و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای جهت رسیدن به پایدارترین حالت ممکن افزایش متان هضم همزمان پسماند آشپزخانه و فضولات گاوی را انجام داده و تولید تجمعی متان با مدل گمپرتز اصلاح شده همخوانی داشته و pH=۷/۵ بهترین میزان برای هضم همزمان پسماند آشپزخانه با فضولات گاوی بدست آمد.

اگر چه مطالعات متعددی در خصوص بهینه سازی تولید بیوگاز از پسماند غذایی با ترکیبات مختلف انجام شده است اما اکثر این مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی بوده و با صرف هزینه های بالایی همچون اضافه کردن مواد شیمیایی و گرم کن های برقی جهت رسیدن به دمای مزوفیلیک جهت تسریع فرایند تولید، نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. در پژوهش حاضر، با ساخت یک Set up با مقیاس بزرگتر از مطالعات قبلی بهینه سازی تولید بیوگاز از پسماند آشپزخانه و کود مرغی به عنوان بیشترین پسماند تولیدی روستایی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین بر خلاف اکثر پژوهش ها بدون استفاده از گرم کن و صرفا استفاده از دمای محیط فرایند تولید بیوگار میزان تولید بیوگاز اندازه

1 Tasnim
2 Dennehy
3 Zhai

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

گیری شده است . همچنین این پژوهش با حذف گاز آلاینده سولفید هیدروژن با استفاده از سنگ آهن و براده های آن به عنوان جاذب های کم هزینه، به راهکاری عملی در این خصوص پرداخته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، در مرحله اول برای تولید بیوگاز از فرایند هضم بی هوازی ناپیوسته ترکیب پسماند مواد غذایی در آشپزخانه (KW[1]) و کود مرغی(CM[2]) در مقیاس آزمایشگاهی و شرایط محیطی استفاده شد و در ابتدا پتانسیل تولید بیوگاز هرکدام از این ترکیبات بصورت خالص بررسی و سپس تاثیر میزان هرکدام از این مواد برروی تولید بیوگاز از نسبت‌های وزنی مختلفی شامل CM:KW و 2KW:CM مشاهده گردید.

جمع‌آوری نمونه‌ها

پسماندهای غذایی به طور تصادفی از رستوران‌های مختلف و کود مرغ نیز از یک مرغداری سنتی در فصل بهار وتابستان جمع‌آوری شدند. قبل از انجام آزمایش، ویژگی‌های اصلی پسماندهای آشپزخانه و کود مرغ در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در جدول ۲ زیر نمایش داده شده است.

جدول ۲. خصوصیات اولیه پسماند مواد غذایی و کود مرغی مورد استفاده در هاضم ها

پارامتر	پسماند آشپزخانه	کود مرغ
pH (۱:۵)	۳/۳۹	۷/۰۹
نیتروژن	۱٪/۱۳	۲٪/۱۶
فسفات	۰٪/۰۸۵	۰٪/۶۹
پتاسیم	۰٪/۲۱۱	۱٪/۱۷
سولفور	۰٪/۵۳۸	۰٪/۲۶۲
جامد فرار	۹۵٪/۲	۵۵٪/۵۵
جامد کل	۲۵٪/۴۵	۵۹٪/۵۶

1 Kitchen wast
2 Chicken manure

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

پارامتر	پسماند آشپزخانه	کود مرغ
Alkalinity (mg/L)	-	۱۰۸۴
BOD (mg/L)	۶۹۵۰	۵۶۲۰
COD (mg/L)	۱۱۲۸۲	۹۴۳۵
OC	۱۶٪/۸۴	۱۶٪/۷۶

روش آزمایش

پس از ترکیب و خرد کردن و همچنین حذف مواد زائد از پسماندها ، پسماندها به داخل هاضم ها ریخته و اسیدیته تمام راکتورها با اضافه کردن NaOH (حقیقت[1] و همکاران ۲۰۱۹) در PH=۷ تنظیم و در ادامه با توجه به نتایج آزمایشگاهی در خصوص درصد جامد کل هریک از مواد، با اضافه کردن آب درصد جامد کل ۸٪ در نظر گرفته تنظیم گردید. درب هاضم ها جهت انجام عملیات هضم بی هوازی کاملا" آب بندی گردید و هوای اضافی مخازن توسط کمپرسور تخلیه گردید. و به جهت انجام بهتر فرایند هضم و ترکیب مواد، به صورت روزانه مخازن کاملا" تکان داده شده و از ته نشین شده مواد جلوگیری به عمل می آمد(گالی پولی[2] و همکاران۲۰۱۷). PH محیط واکنش در طول فرایند و همچنین حجم گاز تولیدی هر ۲ روز یکبار با مانومتر اندازه‌گیری و مورد آنالیز قرار گرفت. بعد از تولید بیوگاز فرآیند جذب گاز سولفید هیدروژن از طریق گردش گاز به وسیله کمپرسور و همچنین استفاده از ستون جذب که در آن از براده‌های آهن و ذرات سنگ آهن به عنوان جاذب استفاده شده بود انجام میگردید. این عملیات به صورت پیوسته و در حالت کاملا" بسته انجام و زمان تقریبی حذف گاز مخرب سولفید هیدروژن اندازه گیری میگردید.

1 Haghighat
2Gallipoli

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



شکل ۱. سامانه آزمایشی تولید بیوگاز

مدل‌های سینتیکی

انواع زیادی از مدل ها وجود دارد که محققان برای تفسیر، بازنمایی و پیش بینی فعالیت بیولوژیکی و تولید استفاده می کنند و با توجه به این مدل های سینتیکی توسعه یافته، فرایند هضم بی هوازی در سوبستراهای مختلف را بررسی و مدلهای ریاضی مختلفی بر داده های آزمایشگاهی برازش کرده اند. (ج.تقی نژاد و همکاران ۱۳۹۷)

در مطالعه ای دیگر در خصوص تولید بیوگاز از زباله های خانگی جهت تولید بیوگاز از سیستم هضم بی هوازی جهت برازش و تجزیه و تحلیل داده ها از مدل سینتیکی گومپرتز استفاده شده است (لائیتی تیا[1] و همکاران ۲۰۱۹)

در این مطالعه از مدل‌های سینتیکی گمپرتز و لجستیک اصلاح شده و مدل بدون فاز تأخیر استفاده شده است. مدل های گمپرتز اصلاح شده معادله (۱) و لجستیک اصلاح شده به دلیل مشترک بودن بین محققان در این زمینه انتخاب شدند (ک.دوبی[2] و همکاران ۲۰۲۰) در حالی که مدل فاز بدون تأخیر

1 Laetitia
2 K.Dubey

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

مدل جدیدتری است که برای تحلیل ساده‌تر بوده و برای اعمال مدل نیاز به پارامترهایی است که به راحتی قابل اندازه گیری می باشند.

$$y = A \times e^{-e^{\frac{\mu m \times e}{A}-(\lambda-t)+1}} \quad (۱)$$

Y: مدل تولید تجمعی بیوگاز (ml)

A: پتانسیل تولید بیوگاز $(\frac{mL}{kg\ VS})$

μ_m: حداکثر نرخ تولید بیوگاز $(\frac{mL}{kg\ VS \times Day})$

e: عدد نپر (۲/۷۱)

λ: فاز تاخیر (day)

t: زمان (day)

پارامترهای A، μ_m و λ بر اساس رگرسیون غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار متلب برآورد شدند. مقادیر y پیش‌بینی شده با تولید تجربی بیوگاز تجمعی مقایسه شده و خطای بین هر مقدار پیدا شد. از این داده‌ها، MSE، RMSE و SSE[1] محاسبه شد.

مدل لجستیک اصلاح شده معادله (۲) یکی دیگر از مدل‌های رایج مورد استفاده در برازش تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی است. این مدل همچنین نیاز به استفاده از رگرسیون غیر خطی برای تناسب مدل با داده های آزمایشی و تعیین پارامترهای استفاده شده توسط مدل دارد.

$$Y = \frac{A}{1+e^{(\left(\frac{4\mu m}{A}\right)(\lambda-t)+2)}} \quad (۲)$$

درست مانند مدل گمپرتز اصلاح شده، پارامترهای A، μ_m و λ بر اساس رگرسیون غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار متلب تخمین زده شدند.

با توجه به اینکه اکثر هضم کننده‌ها، بیو گاز را خیلی سریع تولید می‌کنند و یا زمان تأخیر خیلی کمی دارد می‌توان از مدل بدون فاز تأخیر[2] معادله (۳) استفاده کرد. در این مدل نیز ترسیم داده‌های

1 Sum of Square Error
2 No-Lag Model

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

تجربی در برابر داده‌های مدل و پیش‌بینی‌های مدل تولید بیوگاز برای ترسیم و محاسبه خطا در مقایسه با داده های تجربی انجام میشود (مونوتونگ وازی[1] و همکاران ۲۰۱۸).

$$Y_t = Y_m(1 - e^{-kt}) \quad (۳)$$

که در آن:

k: ثابت شبه مرتبه اول (زمان/۱)

t: زمان (day)

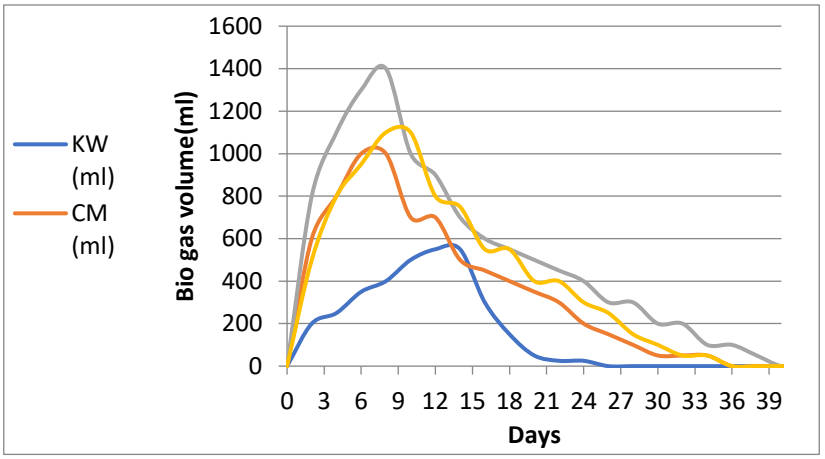
y_m: حداکثر تولید بیوگاز ($\frac{mL\ Biogas}{g\ VS}$)

y_t: بازده تولید بیو گاز در زمان t (ml biogas)

داده‌های تجربی و مدل برای مقایسه بینایی ترسیم و خطا بین هر جفت از نقاط داده‌ها، میانگین خطای مربع (MSE) و خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE) محاسبه شد.

نتایج و بحث

در یک بازه زمانی مشخص میزان تولید بیوگاز از سیستم بصورت روزانه اندازه‌گیری شده و روند تغییرات روزانه تولید بیوگاز در شرایط دمای محیط و نوع ترکیبات مختلف در نمودار نشان داده شده است .

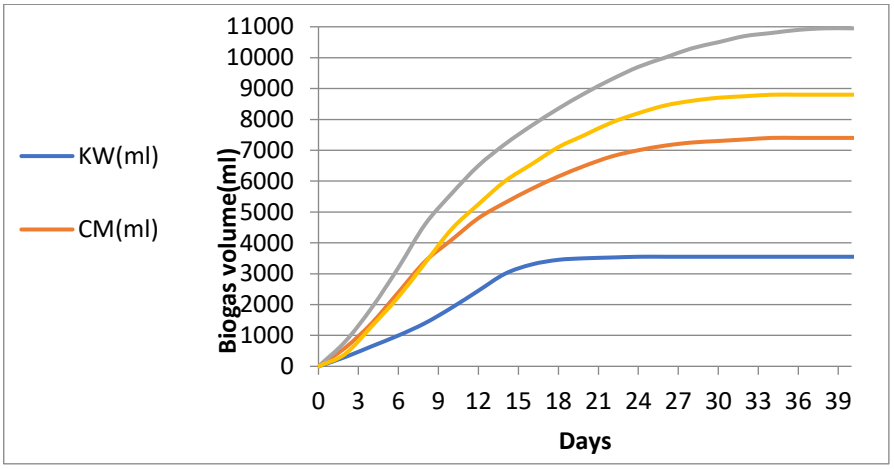


نمودار ۱. مقایسه میزان تولید بیوگاز برای ۴ نسبت مختلف

1 Mutungwazi

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

همانطور که در نمودار آمده بیوگاز تولید شده در آغاز آزمایش مقدار کمی دارد که همان فاز تاخیر رشد میکروبی است و نشان دهنده این است که بیوگاز تولید شده در شرایط بچ[1] وابسته به سرعت رشد باکتری‌های متانوژنیک است. پس از حدود ۱۰ روز میزان تولید بیوگاز بدلیل سرعت رشد نمایی میکروب‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد (نمودار ۱). میزان تولید بیوگاز پس از حدود ۱۰ روز به حداکثر میزان خود می‌رسد. همچنین میزان تولید بیوگاز برای نسبت مساوی از خوراک‌ها بیشترین مقدار را دارد که با نتیجه (اقبال[2] و همکاران ۲۰۱۴) برابر است و نشان دهنده این است که مقدار زیاد مواد هضم کننده تاثیر زیادی برروی هضم مواد ارگانیک و تولید بیشتر بیوگاز دارد. در پایان آزمایش از روز چهلم به بعد نیز میکروب‌ها وارد فاز ساکن خواهند شد و تولید بیوگاز متوقف می‌شود(پاتیل[3] و همکاران ۲۰۱۲)



نمودار ۲. نمودارمقدار تجمعی تولید بیوگاز در طی مدت مشخص که مانند یک تابع

1 Batch condition
2 Iqbal
3 Patil

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

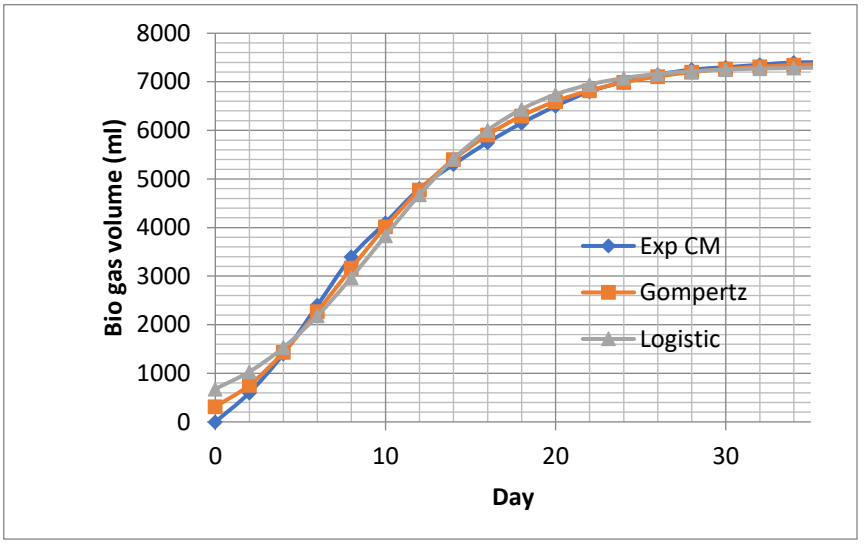
شکل نمودار نمودار مقدار تجمعی تولید بیوگاز در طی مدت زمان ۴۰ روز را نشان میدهد که همانند یک تابع سیگموئید[1] است. مقدار تجمعی تولید بیوگاز پسماند آشپزخانه و کود مرغی با نسبت ۱:۱ بیشترین مقدار را نشان میدهد که بیانگر مناسب بودن میزان ترکیب مواد مغزی تولید کننده بیوگاز می باشد. و پسماند آشپزخانه با تاخیر بیشتری نسبت به بقیه ترکیبات شروع به تولید بیوگاز کرده و در زمان کمتری نیز تولید بیوگاز را متوقف کرده که به دلیل تجمع اسیدهای چرب و در نتیجه کاهش PH به زیر ۶ و اسیدی شدن محیط و از بین رفتن میکروارگانیسم ها می باشد که با نتایج دیگر محققیق نیز همخوانی دارد. (یانگ[2] و همکاران ۲۰۱۵)

سینتیک تولید بیوگاز

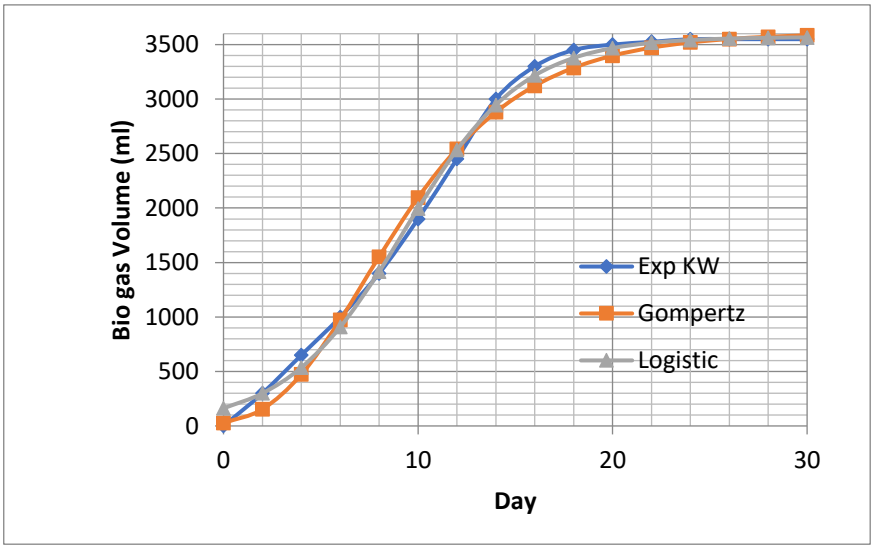
با فرض اینکه بیوگاز تولید شده تابعی از رشد باکتری‌ها در هضم بصورت بچ[3] است، مدل گومپرتز اصلاح شده، لجستیک و No Lag برای انطباق با داده‌های تجمعی بدست آمده، استفاده شدند و نتایج آن در نمودار ۳،۴،۵،۶ رسم و با نتایج تجربی مقایسه شده‌است. همچنین در جدول ۳ و ۴ اطلاعاتی درمورد برازش داده‌ها با مدل های ذکر شده آمده است.

1 Sigmoid function
2 Gaihe Yang
3 Batch

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

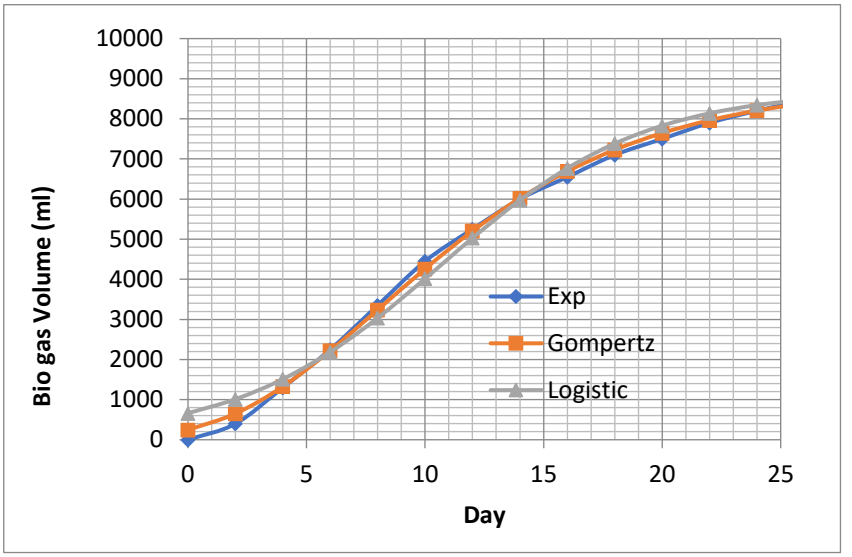


نمودار ۳. مقایسه مدل‌ها با نتایج تجربی برای CM

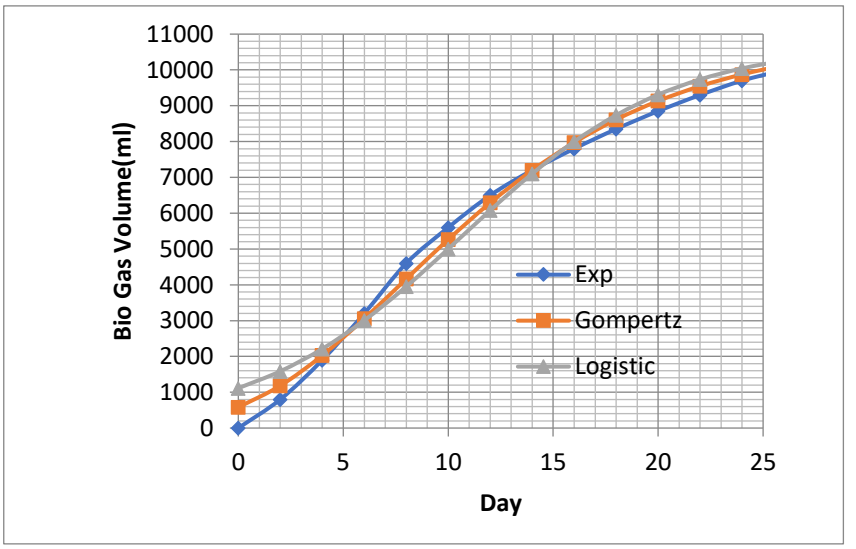


نمودار ۴. مقایسه مدل‌ها با نتایج تجربی برای KW

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



نمودار ۵. مقایسه مدل‌ها با نتایج تجربی برای KW2+CM



نمودار ۶. مقایسه مدل‌ها با نتایج تجربی برای KW+CM

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

جدول ۳. نتایج بدست آمده برای مدل گمپرتز اصلاح شده

ترکیب خوراک	Y(t) [ml]	A [ml/kg VS]	λ [days]	μ [ml/kg VS d]	R^2	RMSE
KW	3550	3609	2.679	292	0.9928	110
CM	7400	7434	0.9381	448.4	0.9977	121.6
KW+CM	10950	11000	0.564	559.9	0.9953	255.3
2KW+CM	8800	8890	1.75	518.3	0.9987	108.7

جدول ۴. نتایج بدست آمده برای مدل لجستیک

ترکیب خوراک	Y(t) [ml]	A [ml/kg VS]	λ [days]	μ [ml/kg VS d]	R^2	RMSE
KW	3550	3570	3.189	293.2	0.9974	66.27
CM	7400	7307	1.174	434.3	0.9896	260.3
KW+CM	10950	10700	0.767	541.6	0.9847	461.7
2KW+CM	8800	8710	2.126	509.8	0.9922	278.7

طبق هردو مدل بالا، میزان فاز تاخیر(λ) برای خوراک با نسبت مساوی از پسماند غذایی و فضولات مرغ (KW+CM) نسبت به سایر حالت ها از مقدار کمتری برخوردار است و نشان میدهد که فرایند تولید بیوگاز در کمترین زمان ممکن نسبت به بقیه هاضم ها شروع شده و برای KW خالص بیشترین مقدار

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

را دارد که نشان دهنده‌ی کمبود میکروب های هضم کننده برای شروع تولید بیوگاز است(ژای[1] و همکاران۲۰۱۵).

نرخ تولید بیوگاز (μ) و پتانسیل تولید بیوگاز (A) برای نسبت (KW+CM) از سایر موارد بیشتر است که نشان دهنده‌ی نقش اساسی مواد هضم کننده موجود در فضولات مرغ جهت ترکیب با پسماند آشپزخانه است.

با توجه مقادیر بدست آمده ، میزان کمتر RMSE و R^2 بالاتر در نتایج مدل گمپرتز اصلاح شده نسبت به مدل لجستیک اصلاح شده نشان دهنده‌ی انطباق بیشتر این مدل با مقادیر تجربی است.

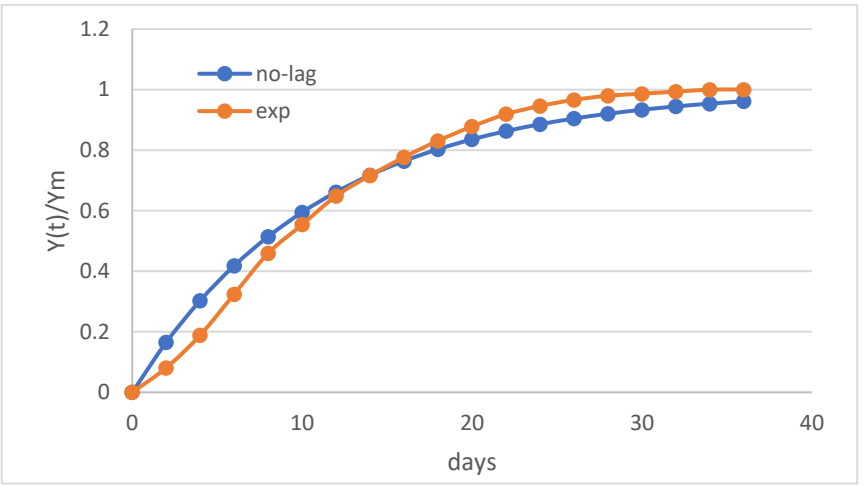
نتایج مربوط به مدل No-lag time در جدول۵ و نمودار های ۷،۸،۹،۱۰ آمده است.

جدول ۵. نتایج بدست آمده برای مدل No lag time

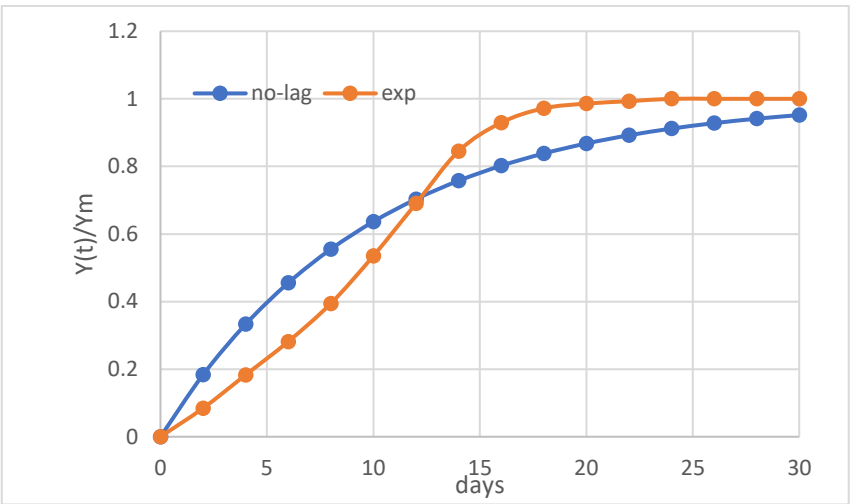
ترکیب خوراک	Y_m (ml)	K	R^2	RMSE
KW	3550	0.1012	0.9129	0.1104
CM	7400	0.0903	0.9705	0.0575
KW+CM	10950	0.0793	0.9774	0.0487
2KW+CM	8800	0.0862	0.9116	0.0932

1 Zhai

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

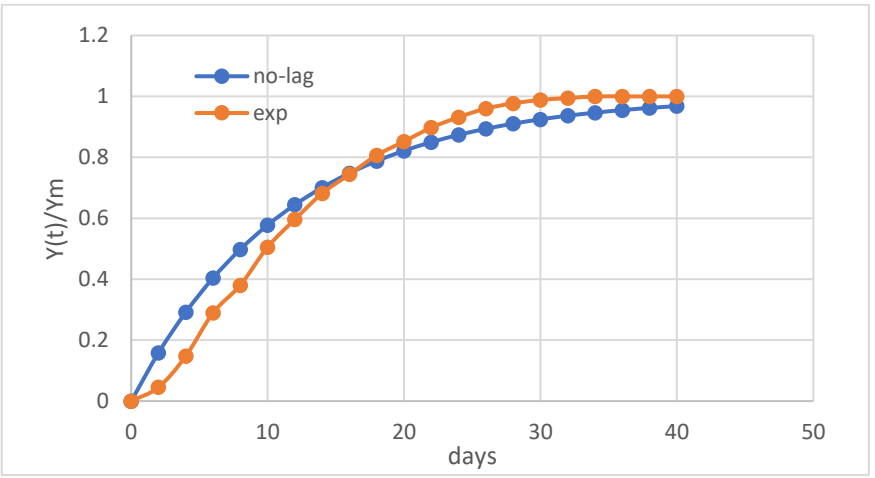


نمودار ۷. نمودار مدل No-lag برایKW

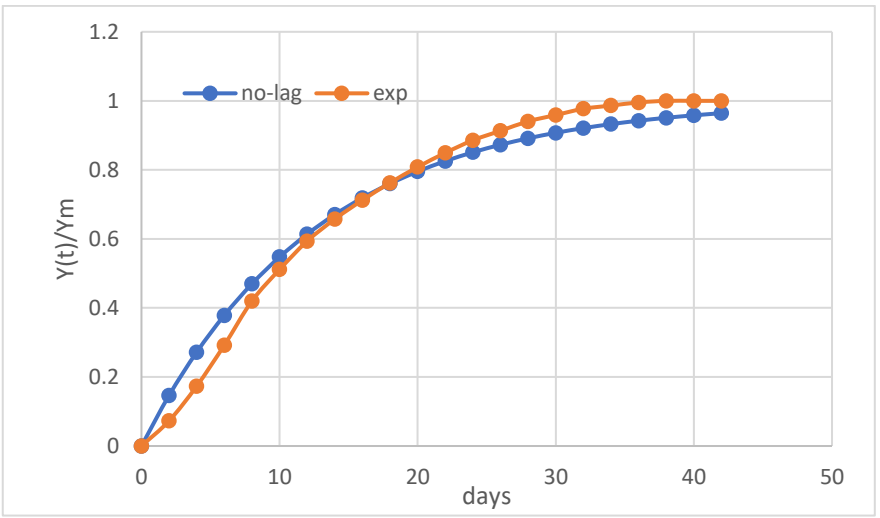


نمودار ۸. نمودار مدل No-lag برای CM

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



نمودار ۹ .نمودار مدل No-lag برایKW+CM

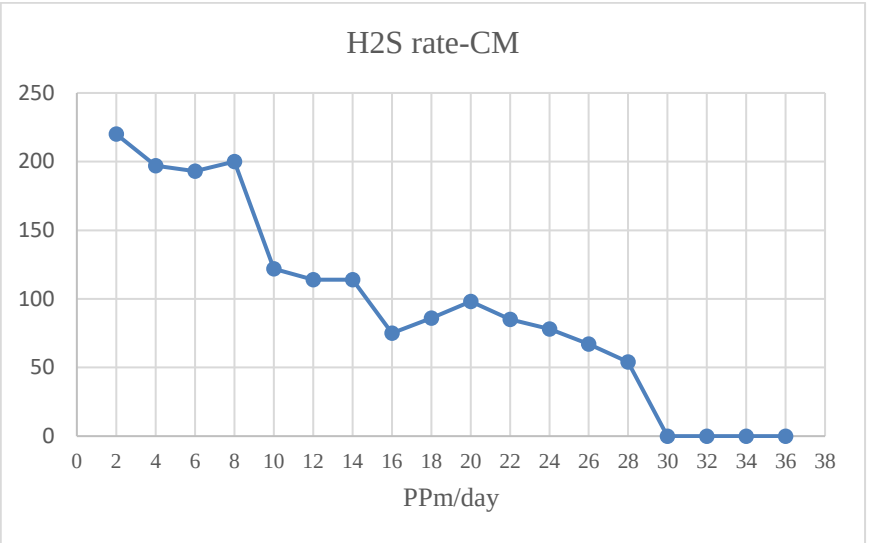


نمودار ۱۰. نمودار مدل No-lag برای ۲KW+CM

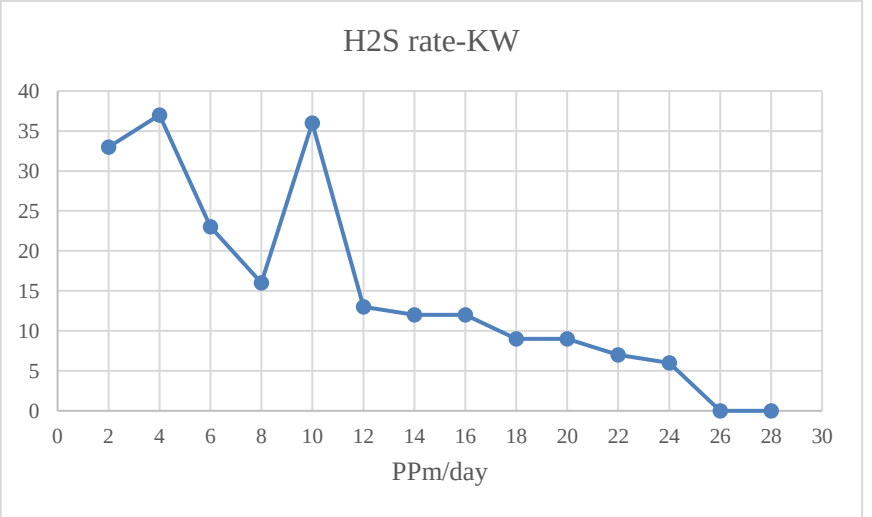
همانطور که در جدول ۵ و نمودار های ۷،۸،۹،۱۰ نشان داده شده، دقت مدل بدون فاز تاخیر نسبت به مدلهای گمپرتز و لجستیک اصلاح شده پایین‌تر است و دلیل آن را می‌توان درنظر نگرفتن فاز تاخیر در ابتدای عمل هضم بی‌هوازی در نظر گرفت.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

آنالیز بیوگاز حاصل از فرآیند هضم بی‌هوازی انجام شده است که نتایج آن در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است. مقدار هیدروژن سولفید موجود در هر نمونه گیری مشخص شده است.

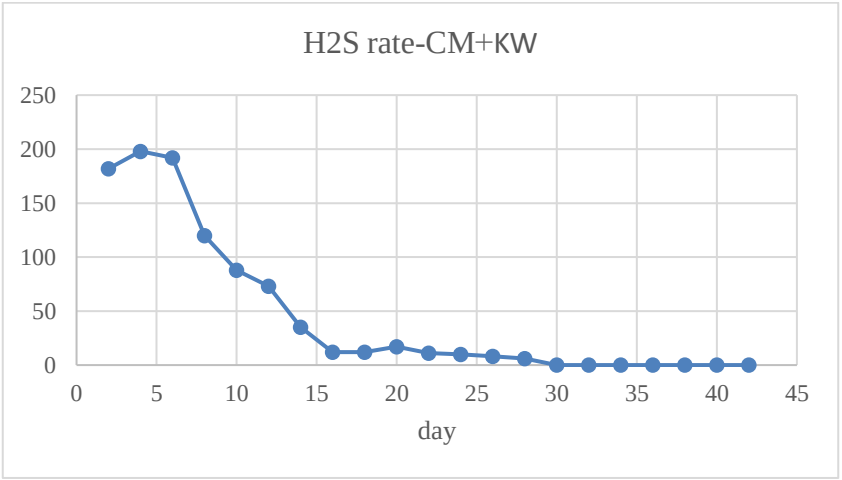


نمودار ۱۱. میزان تولید هیدروژن سولفید در کود مرغ

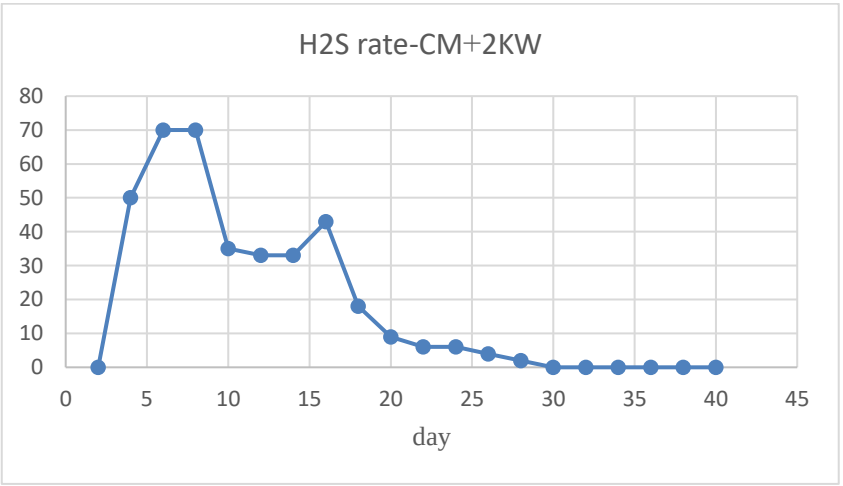


نمودار ۱۲. میزان تولید هیدروژن سولفید در پسماند آشپزخانه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



نمودار ۱۳. میزان تولید هیدروژن سولفید در کود مرغ و پسماند آشپزخانه (۱:۱)



نمودار ۱۴. میزان تولید هیدروژن سولفید در کود مرغ وپسماند آشپزخانه (۱:۲)

طبق نتایج نشان داده شده در نمودار ۱۱تا۱۴ میزان هیدروزن سولفید تولید شده از هضم بی-هوازی کود مرغ نسبت به پسماند آشپزخانه بیشتر است که دلیل آن وجود ترکیبات گوگردی بیشتر در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

کود مرغ است(ساکساری[1] و همکاران۲۰۱۸) . همچنین مشاهده می‌شود که میزان هیدروژن سولفید حاصل در نسبت مساوی از کود مرغ و پسماند آشپزخانه بیشتر از نسبت (۲:۱) کود مرغ و پسماند آشپزخانه است که نشان میدهد به دلیل کاهش تولید بیوگاز نسبت تولید سولفید هیدروژن نیز کاهش می یابد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان تولید بیوگاز از پسماند آشپزخانه و فضولات مرغ به صورت جداگانه و در ادامه با ترکیب آنها به روش هضم بی‌هوازی بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که بیشترین میزان تولید بیوگاز برای نسبت مساوی از این دو ماده، در حدود تقریبی نزدیک به ۱۱۰۰۰ میلی لیتر و در حدود ۲۰۰٪ بیشتر از پسماند آشپزخانه بصورت خالص می باشد. دلیل آن را می‌توان میزان کافی مواد جامد هضم کننده در فضولات مرغ و همچنین کنترل مناسب نسبت کربن به نیتروژن در محدوده مناسب رشد باکتری های متان ساز دانست. همچنین تولید بیوگاز در پسماند آشپزخانه به صورت خالص میزان کمتری از مخلوط آن با پسماند کود مرغی دارد که دلیل آن کمبود درصد جامدات کل و همچنین اسیدی شدن محیط هاضم به دلیل وجود اسید های چرب و از بین رفتن میکرو ارگانیسم ها دانست ولی با توجه به متفاوت بودن میزان تولید بیوگاز در این پسماند با میزان تولید شده توسط سایر محققان در این خصوص لازم است تحقیقات بیشتری انجام شود. در این تحقیق نتایج آزمایش با استفاده از مدل‌های گمپرتز، لجستیک و No-lag انطباق داده‌شد و ثوابت آن‌ها محاسبه شد، دو مدل اول با دقت خوبی برروی اطلاعات منطبق شدند اما مدل No-lag بدلیل درنظر نگرفتن فاز تاخیر در تولید بیوگاز مقداری خطا دارد. برای نسبت مساوی از خوراک‌ها که بیشترین مقدار تولید بیوگاز را داشت ثوابت مدل گمپرتز شامل A (پتانسیل تولید بیوگاز) ، U (بیشترین سرعت تولید بیوگاز) و λ (اولین حجم تولید بیوگاز) به ترتیب برابر با 11000 [ml/kg VS] ; 0.564 [days] ; 559.9 [ml/kg VS d] بدست آمد. این ثابت ها برای مدل لجستیک نیز به ترتیب برابر با 10700 [ml/kg VS] ; 0.767 [days] ; 541.6 [ml/kg VS d] بدست آمد.

1 Saksrithai

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

منابع

[۱] تقی نژاد, جبراییل, عبدی, عدل. (۲۰۱۸). مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از فضولات گاوی در هاضم اختلاط کامل با تغذیه نیمه‌پیوسته. *ماشین های کشاورزی*, ۸(۱), ۱۵۹-۱۶۹.

[۲] صفری, محمود, عبدی, عدل. (۲۰۱۶). بررسی استحصال بیوگاز از پسماندهای ساقهٔ کلزا، محتویات شکمبه وکود گاوی. تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی, ۱۶(۶۵), ۹۳-۱۰۸.

[3] A. Gallipoli, C. M. Braguglia, A. Gianico, D. Montecchio, and P. Pagliaccia, "Kitchen waste valorization through a mild-temperature pretreatment to enhance biogas production and fermentability: Kinetics study in mesophilic and thermophilic regimen," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 89, no. November, pp. 167–179, 2020.

[4] Akbaş, H., Bilgen, B., & Turhan, A. M. (2015). An integrated prediction and optimization model of biogas production system at a wastewater treatment facility. Bioresource technology, 196, 566-576.

[5] Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., & Lyczko, N. (2017). A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. Waste and Biomass Valorization, 8(2), 267-283.

[6] Braguglia, C. M., Gallipoli, A., Gianico, A., & Pagliaccia, P. (2017). Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review. Bioresource technology, 248(Pt A), 37-56.

[7] Can, A. (2020). The statistical modeling of potential biogas production capacity from solid waste disposal sites in Turkey. Journal of Cleaner Production, 243, 118501.

[8] Das, A. K., & Panda, A. K. (2020). Effective utilisation of kitchen waste to biogas by anaerobic co-digestion. In Recent Developments in Waste Management (pp. 1-10). Springer, Singapore.

[9] Dennehy, C., Lawlor, P. G., Croize, T., Jiang, Y., Morrison, L., Gardiner, G. E., & Zhan, X. (2016). Synergism and effect of high initial volatile fatty acid concentrations during food waste and pig manure anaerobic co-digestion. Waste Management, 56, 173-180.

[10] Farid Haghighat, et al. (2019). The effect of thermochemical pre-treatment on biogas production efficiency from kitchen waste using a novel lab scale digester. Renewable Energy Focus, 28, 140-152

[11] Iqbal, S. A., Rahaman, S., Rahman, M., & Yousuf, A. (2014). Anaerobic digestion of kitchen waste to produce biogas. Procedia Engineering, 90, 657-662.

[12] Journal, T. S. W. (2017). Retracted: microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. The Scientific World Journal, 2017.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

[13] Khan, I. U., Othman, M. H. D., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rezaei-DashtArzhandi, M., & Azelee, I. W. (2017). Biogas as a renewable energy fuel–A review of biogas upgrading, utilisation and storage. Energy Conversion and Management, 150, 277-294.
[14] Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. Renewable and sustainable energy reviews, 45, 540-555.
[15] Mondal, C., & Biswas, G. K. (2014). Effect of temperature on kinetic constants in anaerobic bio-digestion.
[16] Mutungwazi, A., Mukumba, P., & Makaka, G. (2018). Biogas digester types installed in South Africa: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 172-180.
[17] Okoro, O. V., & Sun, Z. (2019). Desulphurisation of biogas: a systematic qualitative and economic-based quantitative review of alternative strategies. ChemEngineering, 3(3), 76.
[18] Panigrahi, S., Sharma, H. B., & Dubey, B. K. (2020). Anaerobic co-digestion of food waste with pretreated yard waste: a comparative study of methane production, kinetic modeling and energy balance. Journal of Cleaner Production, 243, 118480
[19] Patil, J. H., Raj, M. A., Muralidhara, P. L., Desai, S. M., & Raju, G. M. (2012). Kinetics of anaerobic digestion of water hyacinth using poultry litter as inoculum. International Journal of Environmental Science and Development, 3(2), 94.
[20] Saksrithai, K., & King, A. J. (2018). Controlling hydrogen sulfide emissions during poultry productions. J Anim Res Nutr, 3(1), 2.
[21] Tasnim, F., Iqbal, S. A., & Chowdhury, A. R. (2017). Biogas production from anaerobic co-digestion of cow manure with kitchen waste and Water Hyacinth. Renewable Energy, 109, 434-439.
[22] Westerholm, M., Liu, T., & Schnürer, A. (2020). Comparative study of industrial-scale high-solid biogas production from food waste: Process operation and microbiology. Bioresource technology, 304, 122981.
[23] Zhai, N., Zhang, T., Yin, D., Yang, G., Wang, X., Ren, G., & Feng, Y. (2015). Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. Waste management, 38, 126-131.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]