

شبیه سازی فرآیند تولید گاز متان از پسماندهای دامی در یک بیوراکتور ناپیوسته

حسین بیکی^{۱*}

hbeiki@qiet.ac.ir

الهام جانانه^۲

تاریخ دریافت: 1394/12/26

تاریخ پذیرش: 1395/8/18

چکیده:

زمینه و هدف: با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و ضرورت استفاده از انرژی های نو و جایگزین سوخت های مرسوم، استفاده از انرژی های تجدید پذیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. با توجه به این ضرورت در این پژوهش یک بیوراکتور ناپیوسته تولید گاز متان از پسماندهای دامی **مدل سازی** و شبیه سازی شده است.

روش بررسی: از سینتیک مونود برای بیان رابطه بین سرعت رشد میکروارگانیسم ها و غلظت سوبسترا استفاده شده است. معادلات مصرف سوبسترا و تولید میکروارگانیسم ها و گاز متان از روش عددی رانگ کوتای مرتبه چهار حل می شوند. اثر غلظت اولیه میکروارگانیسم ها بر تولید گاز متان نیز بررسی شده است. غلظت اولیه سوبسترا و میکروارگانیسم ها به ترتیب $51/74 \text{ g/L}$ و $1/61 \text{ g/L}$ می باشد.

یافته ها: نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که مدل ریاضی حدود $8/53\%$ از داده های آزمایشگاهی انحراف دارد. بر اساس مدل **ارایه** شده میزان گاز متان تولید شده پس از 70 روز برابر با $10/29 \text{ g/L}$ می باشد. میزان تجزیه سوبسترا و تولید گاز متان، به زمان ماند سوبسترا بستگی دارد. افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم ها موجب تولید گاز متان در مدت زمان **کمتری** می شود. میزان گاز متان تولیدی مستقل از غلظت اولیه میکروارگانیسم ها می باشد.

نتیجه گیری: مدل **ارایه** شده در این پژوهش می تواند برای **پیشگویی** مدت زمان مورد نیاز برای انجام واکنش، عملکرد بهینه بیوراکتور، طراحی تجهیزات فرآیندی مربوطه، افزایش مقیاس تجهیزات، مانند مخزن ذخیره سازی و کنترل مناسب جهت تولید متان با خلوص بالا و حجم **بیشتر** در بیوراکتورها مناسب باشد.

کلمات کلیدی: تخمیر **بی هوازی**، بیوراکتور ناپیوسته، **مدل سازی** ریاضی، تولید گاز متان

^۱ استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان، **ایران (مسول مکاتبات)**.

^۲ پزشک عمومی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی مشهد، **ایران**.

Simulation of methane production process from livestock wastes into a batch bioreactor

Hossein Beiki^{1*}

hbeiki@qiet.ac.ir

Elham Jananeh²

Abstract:

Background and objective: Considering the importance of environmental protection and necessity of using new energy sources and innovative fuels, using of renewable energies have been great concern. Due to this necessity, in this study, mathematical modeling and simulation of a batch bioreactor to produce methane from livestock waste was investigated numerically.

Method: The relationship between microorganisms growth rate and substrate concentration were established by Monod model. The equations of mathematical model were solved with fourth order Rung Kutta. The effect of initial microorganisms' concentration on methane production was also investigated. Initial concentration of substrate and microorganisms are 51.74 g/L and 1.61 g/L, respectively.

Results: The results revealed that the mathematical model average deviation from experimental data is 8.53%. The amount of methane produced after 70 days is equal to 10.29 g/L. The substrate disintegration and methane production are a function of substrate retention time. Enhancement in the initial concentration of microorganisms causes methane gas production in less time. The amount of methane gas produced is independent of initial microorganisms' concentration.

Conclusion: The model, which presented in this study, could be used to predict the time required to carry out the reaction, optimum performance of bioreactor, the relevant process equipment design, scale up of equipment, such as digestive and appropriate control of operation to produce high-purity methane and higher volume of biogas in the bioreactor.

Key words:

Anaerobic fermentation, Batch Bioreactor, Mathematical Modeling, Methane gas production

مقدمه :

امروزه یکی از مشکلات اساسی تمامی کشورهای جهان به خصوص کشورهای در حال توسعه، مشکل انرژی می باشد. سوخت رسانی به روستاهای دور افتاده حتی در کشوری مانند ایران که منابع غنی انرژی را در اختیار دارد بسیار مشکل و هزینه بر است. از این رو استفاده از روشهای دیگر تولید انرژی که معایب روشهای مرسوم را نداشته باشند، امری متداول در سراسر جهان شده است. از جمله این روش ها، تولید انرژی از زیست توده^۲ می باشد. یکی از فناوری های تبدیل زیست توده به انرژی، فرآیندهای بیوشیمیایی است. این فرآیندها به

¹ Assistant Prof., Department of Chemical Engineering, Quchan University of Advanced Technology, 67335-94771, Quchan, Iran. (Corresponding Author)

² Medic Student, Faculty of Medicine, Mashhad University of Medical Sciences, Iran.

² Biomass

تخمیر بی‌هوازی، هوازی و الکلی زیست توده تقسیم می‌شود. بیوگاز¹ از روش تخمیر بی‌هوازی زیست توده حاصل می‌شود (1). در فرآیند تخمیر بی‌هوازی مواد آلی² به وسیله واکنش شیمیایی به صورت محلول و قابل جذب برای میکروارگانیسم‌ها در می‌آیند و برای انجام فعالیتهای حیاتی خود، از آن‌ها بهره می‌گیرند (2). بیوگاز، گازی بی‌رنگ، تقریباً بی‌بو، با قابلیت اشتعال پذیری است که درصد قابل توجهی از آن را گاز متان تشکیل می‌دهد. ترکیب بیوگاز در جدول (1) نشان داده شده است. با توجه به جدول (1) بیش از نیمی از ترکیب بیوگاز را متان تشکیل داده است. این موضوع اهمیت بیوگاز را به عنوان منبع سوخت و انرژی جدید نشان می‌دهد.

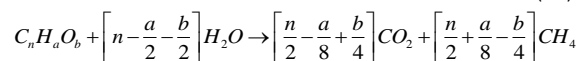
جدول 1- ترکیبات بیوگاز (1)

Table 1- Biogas composition (1)

ترکیب درصد	فرمول	نام گاز
55 تا 75		متان
35 تا 45		دی اکسید کربن
0 تا 1		نیتروژن
0 تا 1		هیدروژن
1 تا 2		سولفید هیدروژن
مقادیر ناچیز		اکسیژن
مقادیر ناچیز		منواکسید کربن

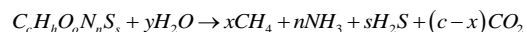
تخمیر بی‌هوازی که به متان زایی بیولوژیکی نیز شهرت دارد، فرآیندی است که به طور طبیعی در اماکن دفن زباله، فاضلاب‌ها و مرداب‌ها انجام می‌پذیرد (2 و 3). از منابع عمده برای تولید بیوگاز، فضولات دامی، فاضلاب‌ها و زباله‌های شهری و صنعتی، زای دات کشاورزی مانند سیبوس برنج، چغندر قند و ... می‌باشند (4 و 5). از آنجا که در کشور ما تمامی منابع مذکور به مقدار زیاد تولید می‌شود بنابراین توانایی بالقوه‌ای در تولید بیوگاز در کشور وجود دارد. امروزه در بسیاری از کشورهای بزرگ و صنعتی اروپایی و کشورهای نظیر کانادا، از بیوگاز برای تولید الکتریسیته و در مقیاس‌های کوچک برای تولید حرارت استفاده می‌شود (6 و 7). از مزایای دیگر بیوگاز می‌توان به صرفه اقتصادی، تولید کم لجن (3 و 8)، حذف مواد معدنی (3 و 9)، حذف بوی بد مواد زای د از محیط (3) و کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای اشاره نمود (10 و 11 و 12). در سال 1952، باسول و مولر³ پیشنهاد کردند که اگر خوراک ورودی به راکتور، مواد آلی با ترکیب معلوم باشد از رابطه (1) می‌توان میزان گاز متان و دی اکسید کربن تولیدی را با حداکثر خطای 5% محاسبه نمود (13 و 14).

(1)



در سال 1976، بویل⁴ با اصلاح رابطه (1)، واکنش زیر را پیشنهاد نمود که در آن با در نظر گرفتن نیتروژن و سولفور، میزان تولید آمونیاک و سولفید هیدروژن را مشخص نمود (15).

(2)



که در آن ضرایب x و y به صورت زیر تعریف می‌شوند.

¹ Biogas

² Organic Matter

³ Buswell and Mueller

⁴ Boyle

(3)

$$x = \frac{1}{8}(4c + h - 2o - 3n - 2s)$$

(4)

$$y = \frac{1}{4}(4c + h - 2o - 3n - 3s)$$

باسرگا¹ در سال 1998 مواد آلی کوسوبستراها را به سه دسته کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و پروتئین‌ها تقسیم کرد و محصول گاز تولیدی و کسر مولی متان را برای این ترکیبات به شکل جداگانه تعیین نمود (16). پژوهش کیمر و شیلچر² بر پایه مدل باسرگا استوار است. آن‌ها با در نظر گرفتن وابستگی سرعت تجزیه به نوع سوبسترا، مدل باسرگا را بهبود بخشیدند (17). آمون و همکاران³، نیز مانند مرجع (17) مواد آلی را برای برآورد میزان انرژی متان از موادی مانند غلات و ذرت تقسیم بندی نمودند (18). به طور کلی مدل کیمر و شیلچر برای سوبستراهای حیوانی و مدل آمون و همکاران برای سوبستراهای گیاهی، مناسب است. با توجه به ضرورت جا ی‌گزینی سوخت‌ها ی فس‌ی‌لی با منابع جدی د، در زمینه افزای ش تولیدی د بی‌وگاز و خلوص گاز متان مطالعات زیادی انجام شده است. در تحقیق‌ی نشان داده شد که کنترل pH بر روی تولید گاز متان بسیار تاثیر گذار است، به طور ی که با کنترل pH راندمان تولید گاز متان حدود 7/6 برابر **بیشتر** از حالتی است که pH فرآیند هضم بی‌هوایی کنترل نم ی‌شود (19). در واقع اس‌ی‌دهای آل ی تولیدی در فرآیند هضم منجر به اسیدی شدن⁴ شد ی‌د مح‌ی‌ط و جلوگیری از تولید گاز متان م ی‌شوند. اثر نانوذرات بر تول ی‌د بی‌وگاز ن ی‌ز مورد بررسی ی‌ قرار گرفته است و نتایج تحقیق نشان م ی‌دهد که استفاده از نانوذرات ن ی‌کل موجب افزای ش 2/17 برابر ی‌ تولیدی د متان نسبت به حالت بدون نانوذره خواهد شد (20).

در زمینه **مدل سازی** و شبیه سازی راکتورهای تولید بیوگاز نیز پژوهش‌های محدودی انجام شده است. ژو و همکاران⁵ در سال 2011 مدل خود را برای سوبستراهایی که از ضایعات کشاورزی می‌باشند در یک تخمیر آزمایشگاهی پایا **ارای ه** دادند و دریافتند که مدل آن‌ها به خوبی توانسته با داده‌های آزمایشگاهی تطابق یابد و می‌توان از آن جهت پیش‌بینی عملکرد واحدهای تولید بیوگاز کشاورزی بهره برد (4). لی و همکاران⁶ در سال 2011 راکتور تولید بیوگاز از چربی‌ها، روغن‌ها، گریس و ضایعات تولید شده در آشپزخانه‌ها را **مدل سازی** کردند. نتایج حاصل از مدل آن‌ها نشان داد که کوسوبستراها، مرحله تاخیر تجزیه بیولوژیکی آلی را به صورت محسوس کاهش می‌دهند. آن‌ها دریافتند که استفاده از ضایعات تولید شده در آشپزخانه‌ها، چربی‌ها و روغن‌ها باعث افزایش میزان تولید گاز متان می‌شود (6). گریدر و همکاران⁷ به بررسی بررسی روند بازده تولید گاز متان در طول تخمیر ذرت پرداختند. آن‌ها توانستند رابطه‌ای میان بازده تولید گاز متان و ترکیب شیمیایی و کیفیت علوفه مورد استفاده ارائه دهند (7). **یبای و آلی** از مدلسازی راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی دریافتند که مدل کنتوز بهترین تطابق را بین سرعت رشد و تجزیه سوبسترا دارد (21). مدلسازی راکتور نیمه پیوسته تولید بیوگاز از ضایعات و زباله

¹Baserga

²Keymer & Schilcher

³Amon et al.

⁴Acidification

⁵Zhou et.al

⁶Li et.al

⁷Grieder et.al

شهری (22)، تولید بیوگاز از رسوبات دریاچه پرور ش میگو با استفاده از هوش مصنوعی (23) و راکتورهای ناپیوسته و پیوسته تولید بیوگاز از تفاله زیتون (24) نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به ن ی از بشر به منابع تجد ی پذیر انرژ ی پژوهش در ای ن زمی نه ضرور ی است. با توجه به مطالعات انجام شده مواد اولیه اکثر مطالعات گذشته شامل ضایعات کشاورزی، گیاهی، پسماندهای شهری و فاضلاب ها می باشد. با توجه به اهمیت پسماندهای دامی در تولید بیوگاز (25-27) در مقاله حاضر بیوراکتور ناپیوسته تولید گاز متان با استفاده از مدل مونود، شبیه سازی شده است. تأثیر تغییرات غلظت میکروارگانیسم ورودی بر میزان مصرف سوبسترا و تولید محصول ن ی ز مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مذکور می تواند برای **پیش گویی** مدت زمان مورد نیاز برای انجام واکنش، عملکرد بهینه، طراحی تجهیزات، افزایش مقیاس تجهیزات، مانند مخزن ذخیره سازی و کنترل مناسب ب روی بیوراکتورها مناسب باشد.

مدل سازی ریاضی

در مقاله حاضر راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز از فضولات و پسماندها ی دامی **مدل سازی** و شبیه سازی شده است. برای تعیین صحت **مدل سازی** (21) پارامترهای سینتیکی و نتایج آزمایشگاهی موجود در مرجع استفاده شده است. همچنین برای ایجاد رابطه بین سرعت تولید میکروارگانیسم ها و سرعت مصرف سوبسترا از مدل مونود استفاده شده است (14 و 22).

فرضیه ها مدل سازی

در **مدل سازی** راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز، فرضیات در نظر گرفته شده عبارتند از: فرآیند 1- در حجم ثابت انجام می گیرد. 2- دما و pH محیط واکنش ثابت و به ترتیب 35°C و 7 می باشد (19 و 21). 3- مواد جامد فرار¹ به بیوگاز تبدیل می شوند. 4- میزان از بین رفتن مواد جامد فرار با میزان تولید بیوگاز متناسب است. 5- **هم زمان** با مصرف سوبسترا در راکتور بیوگاز تولید می شود.

عواملی چون **رشد میکروارگان یسم ها**، تجزیه سوبسترا و شکل گیری مح صول بر روی تولید بیوگاز تأثیر گذار می باشند. در فرآیند ناپیوسته تولید بیوگاز، میزان تجزیه سوبسترا و تولید بیوگاز به زمان ماند سوبسترای ورودی به راکتور بستگی دارد.

رشد میکروارگان یسم ها

موازنه کلی جرم برای میکروارگان یسم ها در راکتور ناپیوسته به صورت زیر می باشد.

(5)

$$\frac{d[X]}{dt} = \mu_{net} [X]$$

که در آن X غلظت میکروارگان یسم ها، μ_{net} نرخ خالص رشد میکروارگان یسم ها و t زمان می باشند.

نرخ خالص رشد میکروارگان یسم ها که در رابطه (6) نشان داده شده است، به صورت تفاضل میکروارگان یسم های تولید شده از میکروارگان یسم هایی که از بین می رود تعریف می شود.

(6)

$$\mu_{net} = \mu - K_d$$

که در آن μ سرعت رشد میکروارگان یسم ها و K_d ضریب مرگ و میر² میکروارگان یسم ها می باشند.

¹Biodegradable Volatile Solids (BVS)

² Decay rate coefficients

از روابط (5) و (6) نتیجه می شود که معادله سرعت واکنش تولید میکروارگانیسم ها از درجه یک می باشد. پایه و اساس **مدل سازی سینتیک رشد باکتری**ها برگرفته از فعالیت دو دانشمند آلمانی به نام میثائیل و منتن¹ است (14 و 21). مدل آن ها در سال 1913 **ارایه** شد و بیان می داشت که فعالیت آنزیمی وابسته به غلظت سوبسترا است (14). مشابه مدل میثائیل- منتن، موند رابطه غیرخطی بین سرعت رشد میکروارگانیسم ها و غلظت سوبسترا را **ارایه** داد. رابطه (7) مدل موند را نشان می دهد.

$$\mu = \frac{\mu_{\max}[S]}{K_s + [S]}$$

که در آن μ_{\max} حداکثر سرعت رشد مخصوص میکروارگانیسم ها، S غلظت سوبسترا و K_s ثابت نیم اشباع می باشند. سرعت رشد مخصوص میکروارگانیسم ها، تابعی از غلظت سوبسترا و سایر شرایط محیطی مانند بازدارنده ها، pH و دما است (14 و 21). در سال های بعد با تکمیل مدل موند، مدل های کامل تری **ارایه** گردید که برای سوبستراهای پیچیده و محیط های ناهمگن مناسب می باشند (14 و 28-30). مدل موند برای محیط های کشت خالص و همچنین سوبستراهای ساده از دقت بالایی برخوردار می باشد (31). این مدل مخصوص محیط های همگن بوده و برای محیط های غیر همگن و سوبستراهای پیچیده مناسب نمی باشد (14). از آنجا که در مقاله حاضر، تولید بیوگاز از فضولات دامی مورد مطالعه قرار گرفته است و فضولات دامی سوبسترای ساده به حساب می آید (21)، بنابراین در شبیه سازی ها از مدل موند استفاده شده است. با ساده سازی رابطه (5) و استفاده از روابط (6) و (7) در آن نهایتاً تغییرات غلظت میکروارگانیسم ها در راکتور ناپیوسته به صورت رابطه (8) می باشد.

$$\frac{d[X]}{dt} = \left(\frac{\mu_{\max}[S]}{K_s + [S]} - K_d \right) [X]$$

مصرف سوبسترا

موازنه کلی جرم سوبسترا برای فرآیندهای ناپیوسته به صورت رابطه (9) می باشد.

$$\frac{d[S]}{dt} = \frac{-\mu[X]}{Y_{X/S}}$$

که در آن $Y_{X/S}$ بازده تولید میکروارگانیسم ها می باشد که به صورت نسبت میکروارگانیسم های تولید شده به سوبسترای مصرف شده تعریف می شود. بنابراین بازده تولید میکروارگانیسم ها را می توان به صورت رابطه (10) نوشت (14 و 32-33).

$$Y_{X/S} = \frac{[X] - [X_0]}{[S_0] - [S]}$$

که زیر نویس 0 در آن به معنی غلظت اولیه است.

تولید محصول

با فرض اینکه **هم زمان** با مصرف سوبسترا، گاز متان در راکتور تولید می شود، معادله تغییرات غلظت گاز متان تولید شده در راکتور ناپیوسته به صورت زیر می باشد (14).

$$\frac{d[P]}{dt} = Y_p \mu [X]$$

که در آن p غلظت گاز متان و Y_p ضریب بازده تولید آن می باشد.

¹ Michaelis and Menten

جهت تعیین میزان گاز متان تولید شده در راکتور، می بایست معادله های (8)، (9) و (11) به طور هم زمان حل شوند. این معادله ها با استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه چهار در نرم افزار Matlab 2013 حل شده اند. نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی مرجع (21) مقایسه شده است. اطلاعات استفاده شده در شبیه سازی در جدول (2) ارایه شده است.

جدول 2- اطلاعات سینتیکی مورد نیاز (21)

Table 2- Kinetic details (21)

ثوابت معادله ها						
مقدار	0/226	24/57 g/L	1/61 g/L	51/74 g/L	0/1085 day ⁻¹	1/41

نتایج و بحث

شبیه سازی انجام شده بر اساس میزان غلظت سوبسترای ورودی 51/74 g/L می باشد. جدول (3) نسبت اجزاء موجود در سوبسترای مورد استفاده را نشان می دهد (21).

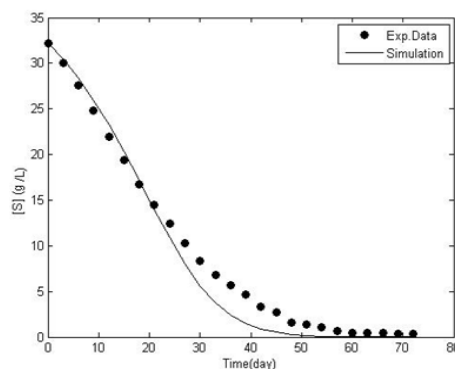
جدول 3 - نسبت وزنی اجزاء در سوبسترای مورد استفاده در تولید بیوگاز (21)

Table 3- Components weight fraction in Substrate used in the production of biogas (21)

نوع آزمایش	% (w/w)
رطوبت	83/91
کل مواد جامد	16/09
کربن موجود در کل مواد جامد	40/70
نیتروژن موجود در کل مواد جامد	2/90
مواد جامد فرار آلی (بر مبنای خشک)	81/52

در شبیه سازی ها از مدل مونود استفاده شده است. مدل مونود برای سوبستراهای ساده از دقت خوبی برخوردار است.

در شکل (1) تغییرات غلظت سوبسترا با زمان نشان داده شده است. با افزایش زمان، سوبسترای ورودی تجزیه شده و بدین ترتیب انرژی لازم برای تولید، رشد و بقای میکروارگانیسم ها تأمین می شود. با توجه به شکل (1) غلظت سوبسترای پس از گذشت تقریباً 70 روز به صفر می رسد.

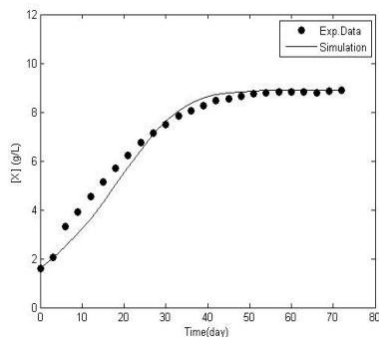


شکل 1- تغییرات غلظت سوبسترا با زمان

Figure 1- Variation of substrate concentration with time

شکل (2) تغییرات غلظت میکروارگانیسم ها با زمان را نمایش می دهد. با افزایش زمان و مصرف سوبسترای ورودی میکروارگانیسم ها شروع به رشد و تکثیر می نماید تا زمانی که با کم شدن غلظت سوبسترا به مقدار ثابتی برسند و با مصرف کامل آن وارد مرحله مرگ شوند. با توجه به شکل های (1) و (2) مشاهده می شود که همزمان با مصرف کامل سوبسترا، تولید میکروارگانیسم ها نیز متوقف شده و به یک مقدار ثابت می رسد. شکل (3) تغییرات غلظت گاز متان تولیدی نسبت به زمان را نشان می دهد. همان گونه که از شکل (3) مشخص است، با افزایش زمان، تولید

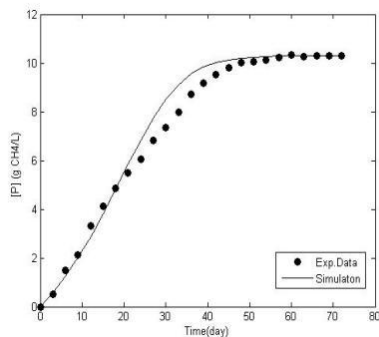
گاز متان نیز افزایش می‌یابد تا زمانی که با مصرف کامل سوبسترا، میزان تولید به یک مقدار مشخص می‌رسد و ثابت می‌ماند.



شکل 2- تغییرات غلظت میکروارگانیسم‌ها با زمان

Figure 2- Variation of microorganisms' concentration with time

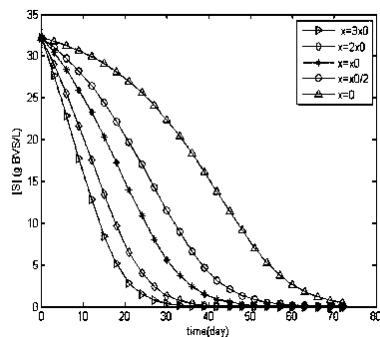
از مقایسه بین نتایج بدست آمده و نتایج آزمایشگاهی **مرجع (21)**، مشخص می‌شود که **مدل‌سازی** انجام شده می‌تواند برای پیش‌بینی میزان تولید گاز متان از فضولات و پسماندهای دامی با دقت خوبی مورد استفاده قرار گیرد. میانگین خطای نسبی متوسط مدل **ارایه** شده برای **پیش‌گویی** میزان گاز متان تولید شده در روز و نتایج آزمایشگاهی 8/53% می‌باشد. با توجه به مطابقت خوب داده‌های آزمایشگاهی با مدل **ارایه** شده اثر غلظت میکروارگانیسم‌های اولیه بر میزان تولید گاز متان در راکتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (4) تأثیر غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها را بر غلظت سوبسترا بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، سرعت مصرف سوبسترا افزایش می‌یابد، زیرا این امر باعث می‌شود که باکتری‌های تولیدکننده بیوگاز در ابتدای فرآیند به طور مستقیم وارد محیط تخمیر شده و عمل تجزیه مواد زودتر شروع شود. به عبارت دیگر، افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، سبب تسریع در سرعت تجزیه سوبسترای ورودی می‌گردد، بنابراین در صورت عدم استفاده از میکروارگانیسم‌ها، یا کاهش غلظت اولیه آن‌ها، مدت زمانی برای تولید خود به خودی میکروارگانیسم‌ها سپری می‌شود تا واکنش تجزیه سوبسترا و تولید بیوگاز شروع شود که به این مدت زمان، مرحله تأخیر¹ گفته می‌شود. با توجه به شکل (4) با کاهش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، زمان مرحله تأخیر افزایش می‌یابد.



شکل 3- تغییرات غلظت گاز متان با زمان

Figure 3- Methane concentration versus time

¹Lag Phase



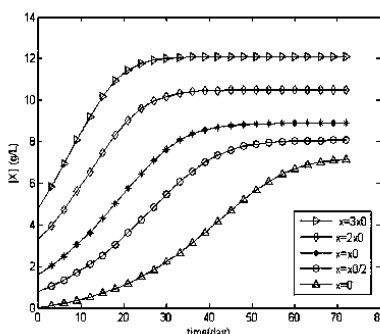
شکل 4- تغییرات غلظت سوبسترای ورودی با زمان برای غلظت‌های ورودی متفاوت میکروارگانیسم‌ها

Figure 4- Variation of inlet substrate concentration with time at different load of microorganisms

با توجه به شکل (5)، با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه سوبسترای ورودی سریع‌تر تجزیه خواهد شد. پس می‌توان انتظار داشت که با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، تولید محصول نهایی در مدت زمان **کم‌تری** انجام پذیرد. همان‌گونه که از شکل (5) مشخص است، رشد میکروارگانیسم‌ها را به چار مرحله می‌توان تقسیم کرد. به عنوان نمونه برای غلظت $X = X_0 = 0$ شرایط زیر برقرار است:

- مرحله تأخیری که تقریباً از زمان صفر الی 9 روز می‌باشد.
- مرحله نمایی¹ که در آن رشد میکروارگانیسم‌ها به صورت تابع نمایی بوده و از روز 9 الی 57 می‌باشد.
- مرحله کاهش سرعت رشد² که دقیقاً بعد از مرحله نمایی است و از روز 57 تا 63 می‌باشد.
- مرحله سکون³ که در آن رشد میکروارگانیسم‌ها ثابت می‌شود و از روز 63 به بعد شروع می‌شود.

شکل (5) نشان می‌دهد که با کاهش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها مرحله تأخیری افزایش می‌یابد و مرحله کاهش سرعت رشد و مرحله سکون به تعویق می‌افتند. در حالی که افزایش غلظت میکروارگانیسم‌ها دقیقاً نتایج معکوسی در پی دارد.



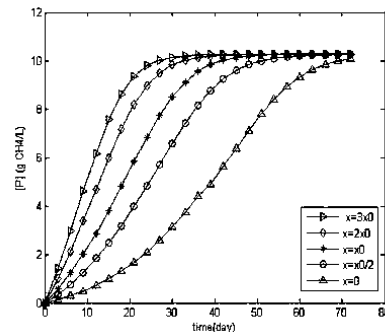
شکل 5 - تغییرات غلظت میکروارگانیسم‌ها با زمان برای غلظت‌های ورودی متفاوت میکروارگانیسم‌ها

Figure 5- The effect of different load of microorganisms on microorganisms' concentration

در شکل (6) مشخص است که افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، با کاهش مرحله تأخیری و افزایش شیب مرحله نمایی، باعث افزایش میزان تولید گاز متان شده است. در تمامی غلظت‌های مورد استفاده، مرحله سکون دارای مقدار معینی

¹Exponential Phase
²Deceleration Phase
³Stationary Phase

می‌باشد. غلظت گاز متان در مرحله سکون برابر با 10/29 g/L می‌باشد. از این رو می‌توان دریافت که حداکثر بیوگاز تولیدی مقدار مشخصی می‌باشد و وابسته به میزان سوبسترای ورودی است. افزایش غلظت میکروارگانیسم‌ها با کاهش مرحله تأخیر باعث تسریع در واکنش و تجزیه سوبسترا می‌شود.



شکل 6- تغییرات غلظت متان تولیدی با زمان برای غلظت‌های ورودی متفاوت میکروارگانیسم

Figure 6- The effect of microorganisms load on methane produced concentration

نتیجه گیری

با توجه به ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مطالعات تئوری در زمینه تولید بیوگاز انجام شده است که اکثراً تولید بیوگاز از پسماندهای گیاهی، چربی، فاضلاب‌ها و ... مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به توانایی کودهای دامی در تولید بیوگاز در این پژوهش راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز از فضولات و پسماندهای دامی **مدل‌سازی** و شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی هاضم تولید بیوگاز با استفاده از مدل سینتیکی ساده انجام شده است و همچنین از روش مرسوم و ساده رانگ کاتای مرتبه 4 جهت حل معادلات استفاده شده است. با این وجود نتایج مدل به خوبی با نتایج آزمایشگاهی فرآیند تولید بیوگاز از پسماندهای دامی مطابقت دارند. در این پژوهش اثر غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها بر تولید گاز متان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

- 1- معادله سرعت تولید میکروارگانیسم‌ها از درجه یک می‌باشد.
- 2- با مصرف کامل سوبسترا، تولید میکروارگانیسم‌ها نیز متوقف شده و به یک مقدار ثابت می‌رسد.
- 3- میزان تجزیه سوبسترا و تولید گاز متان، به زمان ماند سوبسترا بستگی دارد.
- 4- با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، تولید محصول نهایی در مدت زمان **کم‌تری** انجام پذیرد. **همچنین** مرحله تأخیر کوتاه‌تر و **به تبع** آن زمان مورد نیاز برای تجزیه کامل سوبسترای ورودی **کم‌تر** می‌شود.
- 5- تغییر در غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، تغییری در میزان تولید محصول نهایی ایجاد نمی‌کند و فقط با تسریع در عمل تخمیر سوبسترا، باعث افزایش سرعت تولید بیوگاز می‌شود و زمان رسیدن به حداکثر غلظت محصول را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر میکروارگانیسم‌های اولیه همانند کاتالیست عمل می‌کنند. بنابراین می‌توان گفت که واکنش تولید بیوگاز از فضولات دامی، یک واکنش اتوکاتالیستی می‌باشد.

مراجع

- 1- HilkiyahIgoni, A., Abowei M., Ayotamuno, M., Eze, C., 2009. "Comparative Evaluation of Batch and Continuous Anaerobic Digesters in Biogas Production from Municipal Solid Waste using Mathematical Models". The CIGR Ejournal, Manuscript EE Vol. 10, pp. 7-19.
- 2- Buekens, A., 2005. "Energy Recovery from Residual Waste by Mean Anaerobic Digestion Technologies". The Future of Residual Waste Management in Europe Conference.

- 3- Wilkie, A. C., 2005. "Anaerobic digestion". *Biology and Benefits*". Dairy Manure Management Conference, Natural resource, Cornell University, Ithaca, March 15-17, pp. 63-72.
- 4- Zhou, H., Loffer, D., Kranert, M., 2011. "Model-based Predictions of Anaerobic Digestion of Agricultural Substrates for Biogas Production". *Bioresource Technology*, Vol. 102, pp. 10819-10828.
- 5- Show, K., Lee, D., Pan, X., 2013. "Simultaneous Biological Removal of Nitrogen-Sulfur-Carbon: Recent Advances and Challenges". *Bio Technology Advances*, Vol. 31, pp. 409-420.
- 6- Li, Ch., Champagne, P., Anderson, B., 2011. "Evaluating and Modeling Biogas Production from Municipal Fat, Oil and Grease and Synthetic Kitchen Waste in Anaerobic Co-digestions". *Bioresource Technology*, Vol. 102, pp. 9471-9480.
- 7- Grieder, Ch., Mittweg, G., Dhillon, B., Montes, J., Orsini, E., Melchinger, A., 2012. "Kinetics of Methane Fermentation Yield in Biogas Reactor: Genetic Variation and Association with Chemical Composition in Maize". *Biomass and Bioenergy*, Vol.37, pp. 132-141.
- 8- Meltcalf and Eddy, 2003. "Wastewater Engineering-Treatment, Disposal and Reuse". 4thEdition, Tata McGraw Hill, New Delhi.
- 9- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. B., Hamidi, M., 2005. "Bioreactor Performance in Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Wastes". *Process Biochem*, Vol. 40, pp. 989-995.
- 10- Callaghan, F.J., Wase, D. A. J., Thyaniythy, K., Forster, C. F., 2002. "Continuous CoDigestion of Cattle Slurry with Fruit and Vegetable Waste and Chicken Manure". *Biomass Bioenergy*, Vol. 27, pp. 71-77.
- 11- Vieitez, E. R., Ghsh, S., 1999. "Bio gasification of Solid Wastes by Two phases Anaerobic Fermentation". *Biomass and Bioenergy*, Vol. 16, pp. 299-309.
- 12- Mata Alvarez, J., Maca, S., Liabres, P., 2000. "Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of Research Achievements and Perspectives". *Bio resours Technology*, Vol. 74, pp. 3-16.
- 13- Buswell, A. M., Mueller, H. F., 1952. "Mechanism of Methane Fermentation", *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 44, pp. 550 – 552.
- 14- Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
- 15- Boyle, W. C., 1977. "Energy Recovery from Sanitary Landfills". *Microbial Energy Conversion*, Edited by: H. G. Schlegel & J. Barnea, pp. 119 – 138.
- 16- Baserga, U., 1998. "Land wirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. FAT-Berichte Nr. 512, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, Schweiz. **Cited by** Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
- 17- Keymer, U.; Schilcher, A., 2003, "Biogasanlagen: Berechnung der Gasausbeute von Kosubstraten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. **Cited by** Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
- 18- Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Machmüller, A.; Hopfner-Sixt, K.; Bodiroza, V.; Hrbek, R.; Friedel, J.; Pötsch, E.; Wagentristl, H.; Schreiner, M.; Zollitsch, W.; Pötsch, E., 2007 : Methane Production through Anaerobic Digestion of Various Energy Crops Grown in Sustainable Crop Rotations. *Bioresource Technology*, Vol. 98, No. 17, 3204 -3212. **Cited by** Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
- 19- Yang, L., Huang, Y., Zhao, M., Huang Z., Miao, H., Xu, Z., Ruan, W., 2015. "Enhancing biogas generation performance from food wastes by high solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 105, pp. 153-159.
- 20- Abdelsalam, E., Samer, M., Attia, Y. A., Abdel-Hadi, M. A., Hassan, H. E., Badr, Y., 2016, "Comparison of nanoparticles effects on biogas and methane production from anaerobic digestion of cattle dung slurry", *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 592-598.
- 21- Beba, A., Atalay, F. S., 1986. "Mathematical Models for Methane Production in Batch Fermenters". *Biomass*, Vol. 11, pp. 173 – 184.
- 22- Biswas, J., Chowdhury, R., Bhattacharya, P., 2006. "Experimental Studies and Mathematical Modeling of a Semibatch Bio-digester Using Municipal Market Waste as Feed Stock". *Indian Journal of Biotechnology*, Vol. 5, pp. 498-505.
- 23- Srisertpol, J., Srinakorn, P., Kheawnak, A., Chamniprasart, K., 2010. "Mathematical Modeling and Parameters Estimation of an Anaerobic Digestion of Shrimp of Culture Pond Sediment in a Biogas Process". *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 4, pp. 213-220.
- 24- Gavala, H.N., Skiadas, I.V., Ahring, B.K., Lyberatos, G., 2006. "Thermophilic anaerobic fermentation of olive pulp for hydrogen and methane production: modeling of the anaerobic digestion process". *Water Sci. Technol*, Vol. 53, pp. 271–279.

- 25- Afazeli, H., Jafari, A., Rafiee, Sh., Nosrati, M., 2014, "An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 380-386.
- 26- Noorollahi, Y., Kheirrouz, M., Farabi Asl, H., Yousefi, H., Hajinezhad, A., 2015, "Biogas production potential from livestock manure in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 748-754.
- 27- Abdeshahian, P., Lim, J. Sh., Ho, W., Hashim, H., Lee, Ch. T., 2016, "Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 714-723.
- 28- Powell, E. O., 1967. "The Growth Rate of Microorganisms as a Function of Substrate Concentration", *Microbial Physiology and Continuous Culture. 3rd International Symposium*, Salisbury, London, pp. 34– 56.
- 29- Birjukow, W. W.; Kantere, W. M., 1985. "Optimizing periodical processes of microbiological synthesis", (russ.). Nauka, Moskau.
- 30- Gompertz, B., 1825. "On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies", *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 115: pp. 513-585.
- 31- Contois, D. E., 1959. "Kinetics of Bacterial Growth: Relationship between Population Density and Specific Growth Rate of Continuous Cultures". *Journal of General Microbiology*, Vol. 21, pp. 40 – 50.
- 32- Okpokwasili, G. C., Nweke, C. O., 2005. "Microbial Growth and Substrate Utilization Kinetics". *African Journal of Biotechnology* Vol. 5, pp. 305-317.
- 33- Aworanti, O. A., Agarry, S. E., Arinkoola, A. O., Adeniyi, V., 2011. "Mathematics Modeling for the Conversion of Animal Waste to Methane in Batchbioreactor". *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 3, pp. 573-581.