



## بررسی شرایط عملکردی فرآیند هضم بی‌هوازی به منظور افزایش بازده تولید بیوگاز در یک راکتور اختلاط کامل (CSTR)

مجید رسولی<sup>۱\*</sup>، حسین حاجی آقا علیزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا؛ m.rasouli@basu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا؛ h-alizade@basu.ac.ir

### چکیده

در پژوهش حاضر آزمایش‌ها در مقیاس پایلوت روی هضم فضولات گاو شیری با استفاده از یک راکتور اختلاط کامل (CSTR) و با خوراک‌دهی نیمه پیوسته برای تعیین اثر نرخ بارگذاری مواد آلی (OLR)، دما و رژیم همزدن روی بیوگاز تولیدی و بازده آن انجام شد. روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM) برای طراحی و آنالیز آزمایش‌ها و همچنین بهینه کردن نرخ خوراک‌دهی، دما و درجه‌ی همزدن طی فرآیند تولید بیوگاز، به کار برده شد. آزمایش‌ها با استفاده از تکنیک طراحی ترکیب مرکزی (CCD)، طراحی شدند. دو مدل ریاضی درجه دو برای تخمین پاسخ‌ها به دست آمد. بهترین مدل برای نرخ تولید بیوگاز، مدل کاهش یافته‌ی درجه دوم بود. تاثیر دما و نرخ بارگذاری مواد آلی روی بیوگاز تولیدی و بازده آن بیشتر از تاثیر درجه‌ی همزدن معنی‌دار بود. در فرآیند بهینه‌سازی، بیشترین مقدار تولید بیوگاز و بازده آن به ترتیب  $0.672 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ day}$  و  $0.103 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$  و  $4 \text{ kg VS}/\text{m}^3 \text{ day}$  دمای  $40^\circ\text{C}$  و رژیم همزدن  $20 \text{ rpm}$  در دقیقه برای  $10$  دقیقه در هر  $2$  ساعت، به دست آمد.

کلمات کلیدی: هضم بی‌هوازی؛ بیوگاز؛ راکتور اختلاط کامل (CSTR)؛ بهینه‌سازی؛ روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM)؛

## Investigation of Operating conditions of anaerobic digestion Process for enhanced biogas production yield in a CSTR reactor

Majid Rasouli\*, Hossein Haji Agha Alizade<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### ABSTRACT

In this study, Pilot scale experiments were performed on the digestion of dairy cow manure in a semi-continuous process using a completely stirred tank reactor (CSTR) to determine the effects of organic loading rate (OLR), temperature and mixing levels on production biogas and methane yield. Response surface methodology (RSM) was applied for the design and analysis of experiments with the optimization of OLR, temperature and mixing level during the biogas production process. Experiments were designed as per the central composite design technique. Four cubic mathematical models were derived for prediction of the responses. The optimization study has been carried out to identify the highest yields achievable when the factors temperature and mixing are minimized. The influence of temperature and OLR on biogas production was more significant than the influence of mixing level. In process optimization, maximum values of biogas production and methane yield were achieved as  $0.672 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ day}$  and  $0.103 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ , respectively, with an OLR of  $4 \text{ kg VS}/\text{m}^3 \text{ day}$ , temperature of  $40^\circ\text{C}$  and mixing regime of  $20 \text{ rpm}$  for  $10 \text{ min}$  per  $2 \text{ hours}$ .

**Keywords:** Anaerobic digestion; Biogas; completely stirred tank reactor (CSTR); Optimization; Response

\*Corresponding author: E-mail address: [m.rasouli@basu.ac.ir](mailto:m.rasouli@basu.ac.ir), Fax: +98 81 34422128. Tel.: +98 81 34422127.



surface methodology (RSM).

## ۱- مقدمه

هضم بی‌هوازی، فرآیندی بیولوژیکی است که مواد تجزیه پذیر را در غیاب اکسیژن به بیوگاز تبدیل می‌کند. بیوگاز ارزش گرمایی بالایی دارد و می‌تواند الکتریسیته و گرما تولید کند (Cao & Pawłowski, 2012). بیوگاز معمولاً حاوی ۵۰ تا ۸۰ درصد متان و ۲۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسید کربن و نیز مقادیر اندکی نیتروژن، هیدروژن، سولفید هیدروژن می‌باشد (Cheng, 2010).

فرآیند هضم بی‌هوازی برای تبدیل ترکیبات آلی به بیوگاز از یک سری متابولیسم میکروبی پیچیده تشکیل شده است که به چهار مرحله اصلی هیدرولیز، اسید زایی، استات زایی<sup>۳</sup> و متان زایی<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود. هر یک از این چهار مرحله دارای واکنش‌های بیوشیمیایی مختلف با سوبستراها<sup>۵</sup> و میکروارگانیسم‌های مختلف می‌باشند (Appels et al., 2008; Cheng, 2010; Deublein & Steinhäuser, 2008; Khanal, 2008). میکروارگانیسم‌های مؤثر در این مراحل به ترتیب، هیدرولیزکننده‌ها<sup>۶</sup>، اسیدزها (اسیدوژن‌ها)<sup>۷</sup>، استات‌زها (استوژن‌ها)<sup>۸</sup> و متان‌زها (متانوژن‌ها)<sup>۹</sup> می‌باشند که ترکیبات آلی پیچیده را به ترکیبات ساده‌تر تجزیه می‌کنند، که در نهایت به تثبیت ضایعات آلی و تولید بیوگاز می‌انجامد (Bouallagui et al., 2005; Cheng, 2010).

عملکرد هضم بی‌هوازی به طور عمده به ویژگی‌های خوراک، پارامترهای خوراک دهی، pH، دما، پتانسیل اکسایش-کاهش، زمان ماند هیدرولیکی، زمان ماند جامد و خصوصیات هم‌زدن وابسته است (Terashima et al., 2009). در هضم بی‌هوازی باید به نرخ بارگذاری مواد آلی (OLR) خیلی توجه کرد. بارگذاری بیش از حد مواد آلی باعث توقف فرآیند هضم می‌شود (Xie et al., 2017). به طور معمول نرخ بارگذاری مواد آلی برای دایجسترهای هضم بی‌هوازی اختلاط کامل بین 1-5 kg COD m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> می‌باشد (Tchobanoglous et al., 2003). در هاضم بی‌هوازی کاملاً هم‌زده بیشترین غلظت زیست توده موجود در راکتور تابع نیاز هم‌زدن مناسب می‌باشد (Khanal, 2008).

مطابق تحقیقات صورت گرفته در گذشته، عملکرد هضم بی‌هوازی متاثر از پارامترهای مهمی مانند دما (Ahring et al., 2001; Angelidaki & Collins et al., 2000; Guo et al., 2011; Mähnert & Linke, 2008) (OLR)، نرخ بارگذاری مواد آلی (Ahring, 1994; Divya et al., 2015) و رژیم هم‌زدن (Kaparaju et al., 2008a; K. Karim et al., 2005; Khursheed Karim et al., 2005) می‌باشد. انرژی لازم برای عمل هم‌زدن حدود ۲۰٪ از انرژی کل ورودی راکتورها را تشکیل می‌دهد. طراحان و اپراتورهای صنعتی امروزه به دنبال حداقل کردن شدت هم‌زدن به منظور حداقل کردن هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی بدون کاهش بیوگاز تولیدی می‌باشند.

استفاده از یک روش مناسب برای بررسی اهمیت شرایط عملکردی و تعیین برهم‌کنش‌های آن‌ها به منظور مشخص نمودن عواملی که در عمل به‌توان از آن‌ها برای کنترل هاضم‌های بی‌هوازی استفاده نمود. هدف از انجام این پژوهش تعیین شرایط بهینه برای حداکثر کردن راندمان تولید بیوگاز می‌باشد. بنابراین در این تحقیق اثر سه پارامتر عملکردی دما، نرخ بارگذاری مواد آلی و رژیم هم‌زدن بر روی تولید بیوگاز و بازده آن بررسی گردید.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- روش راه اندازی راکتور

اغلب اوقات لازم است در مرحله‌ی راه‌اندازی، مایه‌ی تلقیح غنی شده به هاضم افزوده شود. معمولاً از لجن راکتور در حال کار، کود کاملاً پوسیده و یا دوغاب فضولات گاوی به عنوان مایه‌ی تلقیح استفاده می‌شود (Yadvika et al., 2004). برای راه‌اندازی راکتور، ۳۰ لیتر سوبسترا شامل ۸۸٪ آب و ۱۲٪ (v/v) فضولات گاوی تازه درون راکتور ریخته شد و برای مدت ۱۵ روز، در شرایط عملکردی آزمایش باقی ماند. بعد از ۱۵ روز، خوراک‌دهی پیوسته راکتور شروع شد. نرخ خوراک‌دهی به صورت نیمه‌پیوسته بود، به طوری که زمان ماند هیدرولیکی به ۱۵ روز می‌رسید. برای انجام آزمایش‌ها مطابق طراحی آزمایش انجام شده (DOE)، راکتور به مدت ۲۱۰ روز خوراک‌دهی شد. به منظور تغییر بار آلی ورودی به راکتور، فضولات گاوی با آب شهری رقیق شده

<sup>1</sup>Hydrolysis  
<sup>2</sup>Acidogenesis  
<sup>3</sup>Acetogenesis  
<sup>4</sup>Methanogenesis  
<sup>5</sup>Substrate  
<sup>6</sup>Hydrolytic  
<sup>7</sup>Acidogen  
<sup>8</sup>Acetogens  
<sup>9</sup>Methanogens  
<sup>10</sup>Semi-continuous



و در مخزن تغذیه ریخته می‌شد.

## ۲-۲- روش‌های آنالیز

جامدات کل (TS)، کل جامدات معلق (TSS) و کل جامدات فرار (TVS) براساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (APHA et al., 1998). برای اندازه‌گیری pH، از pH متر (Metrohm) ساخت آلمان استفاده شد.

## ۲-۳- روش طراحی آزمایش‌ها

فرآیند هضم بی‌هوازی شامل واکنش‌های زنجیره‌ای پیچیده‌ای است که به‌طور کلی فرضیات متعددی برای حل معادلات فیزیکی، شیمیایی و زیستی حاکم بر آن لازم است. بنابراین مدل‌های پایا اساساً قادر به پیش‌بینی عوامل مورد ملاحظه در موازنه‌ی جرم هستند، اما پاسخ‌های مرتبط را نمی‌توانند تخمین بزنند (Sötemann et al., 2005). روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی برای مدل‌سازی و آنالیز مسابلی است که در آن پاسخ مورد نظر تحت تاثیر متغیرهای مختلف قرار گرفته است و هدف، بهینه‌سازی پاسخ می‌باشد (Montgomery, 2008). تکنیک RSM دارای کاربرد قابل توجهی در طراحی فرآیند، بهینه‌سازی و بهبود طرح‌های موجود می‌باشد. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها عملی‌تر است، زیرا از روش عملی که دربرگیرنده برهم‌کنش‌های متغیرهاست سرچشمه گرفته، و در نهایت اثر کلی عوامل بر روی فرآیند را نشان خواهد داد (Deniz, 2007; Baş & İsmail H Boyacı, 2007). طراحی ترکیب مرکزی (CCD) به‌طور وسیع در ایجاد مدل‌های پاسخ سطح درجه دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش CCD یکی از مهم‌ترین طراحی‌های تجربی مورد استفاده در مطالعات بهینه‌سازی فرآیند می‌باشد (Anderson & Whitcomb, 2015; Deniz, 2009; Baş & İsmail H. Boyacı, 2007; Montgomery, 2008; Myers et al., 2009).

روش سطح پاسخ مورد استفاده در این تحقیق CCD می‌باشد، که متداول‌ترین روش طراحی آزمایش است. تعداد ۱۵ آزمایش مطابق رابطه‌ی  $N = k^2 + 2k + c_p$  در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول مقادیر واقعی و کد شده‌ی متغیرهای مستقل در پنج سطح و پاسخ مربوط به هر آزمایش آورده شده است. به‌طور کلی تعداد ۱۵ آزمایش انجام شد، که ۸ آزمایش به‌صورت طراحی فاکتوریل، ۶ آزمایش به‌صورت محوری<sup>۱</sup> و یک آزمایش تکراری نقطه‌ی مرکزی جهت تخمین مناسب خطای آزمایش‌ها هستند. آزمایش‌ها به‌وسیله‌ی نرم‌افزار Design Eepert نسخه 10.0.0 یا DX-10 (تولید شرکت State-Ease) با ۳ متغیر و ۳ سطح طراحی شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نتایج طراحی CCD و برازش مدل‌های رگرسیونی

همانطور که گفته شد با استفاده از روش RSM-CCD، ۱۵ آزمایش طراحی گردید. ماتریس طراحی RMS برای دو مقدار واقعی و کد شده‌ی متغیرهای ورودی و پاسخ‌های آن‌ها جدول ۱ ارائه شده است. پاسخ‌های به‌دست آمده در نرم‌افزار Design Expert-10 وارد شدند و براساس آن‌ها روابط درجه دومی به‌دست آمد که به‌خوبی پاسخ متغیرها را پیش‌بینی می‌نمایند (روابط (۱) و (۲)). نتایج آنالیز واریانس برای مدل‌های سطح پاسخ در جدول ۲ به‌طور خلاصه ارائه شده است. مقادیر ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای روابط درجه دوم بالا است، که نشان می‌دهد این روابط فرآیند را در محدوده‌ی تغییرات مورد نظر به‌خوبی توصیف می‌نمایند. ناچیز بودن اختلاف میان مقادیر  $R^2$  و ضریب همبستگی تعدیل یافته ( $Adjusted-R^2$ ) نشان می‌دهد که عبارات موجود در روابط موثر هستند. مناسب بودن روابط از طریق آزمایش‌های F-عدم‌برازش<sup>۲</sup> آسنجیده می‌شود (Montgomery, 2008). عدم‌برازش استاتیک-F از لحاظ آماری اهمیتی ندارد زیرا مقادیر p کوچکتر از ۰/۰۵ می‌باشند. دقت مناسب<sup>۳</sup> معیاری از محدوده‌ی پاسخ پیش‌بینی شده نسبت به خطای مربوطه یا به عبارت دیگر، نسبت علامت به اختشاش<sup>۴</sup> است. مقدار مطلوب دقت مناسب، برابر ۴ یا بالاتر است (Mason et al., 2003). همانطور که در جدول ۲ مشخص است مقادیر دقت مناسب برای روابط به‌دست آمده قابل قبول است. مقادیر کوچک ضریب تغییرات<sup>۵</sup> برای پاسخ‌ها نشان می‌دهد که آزمایش‌ها دارای دقت مناسب بوده و قابل اتکاء می‌باشند.

<sup>1</sup>Axial design

<sup>2</sup>Lack-of-fit F-static

<sup>3</sup>Adequate precision

<sup>4</sup>Signal-to-Noise ratio

<sup>5</sup>Coefficient of Variation (CV)



## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



### ۳-۲- اثر دما روی پاسخ ها

اثر دما روی پاسخ ها در شکل ۳۲ و شکل ۳۳ تاثیر دما و OLR بر روی نرخ تولید بیوگاز و بازده آن نشان داده شده است. افزایش دما از ۲۵°C به ۴۰°C یا کاهش آن از ۶۵°C به ۵۵°C تاثیر مثبت بر روی نرخ تولید بیوگاز و بازده آن دارد. بنابراین بهترین دما برای نرخ تولید بیوگاز و بازده متان حداکثر، دمایی نزدیک به ۴۰°C و ۵۵°C می باشد. متوسط نرخ حجمی تولید بیوگاز برای زمانی که راکتور در دمای ۲۵°C و نرخ خوراک دهی  $kg\ vs\ m^{-3}\ d^{-1}$  عمل می کند  $0.44\ m^3\ m^{-3}\ d^{-1}$  بود. در حالی که در دمای ۵۵°C نرخ تولید بیوگاز به  $0.63\ m^3\ m^{-3}\ d^{-1}$  رسید. با این حال با افزایش دمای راکتور به ۶۵°C نرخ تولید بیوگاز ناگهان کاهش پیدا کرد. با توجه به نتایج ارائه شده کاملاً واضح است که فرآیند هضم بی هوازی به شدت وابسته به دما می باشد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین هم خوانی دارد. آن ها نشان دادند که افزایش دما از ۵۵°C به ۶۵°C باعث کاهش بازده متان از  $20\ ml\ g^{-1}\ vs\ d^{-1}$  به  $165\ ml\ g^{-1}\ vs\ d^{-1}$  شد (Ahiring et al., 2001). نتایج مشابه توسط دیگر محققین نشان می دهد هضم بی هوازی در محدوده دمایی سایکروفیل (کمتر از ۳۰°C)، مزوفیل (۳۰-۴۰°C)، ترموفیل (۵۰-۶۰°C) و ترموفیل افراطی (بالتر از ۶۰°C) قابل انجام است (Hackett et al., 2004; Yadvika et al., 2004). ولی نرخ تولید متان از هضم بی هوازی فضولات گاوی در دمای سایکروفیلیک نسبت به دمای مزوفیلیک و دمای ترموفیلیک کاهش می یابد (René Alvarez & Lidén, 2008; Hansen et al., 1998; Zeeman et al., 1985). در محدوده دمایی بین ۴۰-۵۰°C (حالت گذار دمایی از مزوفیل به ترموفیل)، فعالیت باکتری های متان زا دچار مشکل می شود (Gerardi, 2003). به دلیل فعالیت اندک میکروارگانیسم ها و محدود شدن فعالیت باکتریهای متان زای استوکلاستیک در شرایط سایکروفیل، جامدات معلق در هاضم انباشته می شوند و تولید متان کاهش می یابد (Bouallagui et al., 2004).

جدول ۱- طراحی آزمایش ها (RSM) و پاسخ های به دست آمده از انجام آزمایش ها

Std	A	B	C	Bio-gas production rate	Bio-gas yield
				$m^3\ m^{-3}\ d^{-1}$	$m^3\ kg^{-1}\ vs\ added$
	Coded (Actual)	Coded (Actual)	Coded (Actual)		
1	-1(1.61)	-1(25.13)	-1(~20)	0.17	0.15
2	+1(3.39)	-1(25.13)	-1(~20)	0.28	0.107
3	-1(1.61)	+1(54.87)	-1(~20)	0.32	0.231
4	+1(3.39)	+1(54.87)	-1(~20)	0.63	0.177
5	-1(1.61)	-1(25.13)	+1(~80)	0.15	0.13
6	+1(3.39)	-1(25.13)	+1(~80)	0.44	0.124
7	-1(1.61)	+1(54.87)	+1(~80)	0.2	0.196
8	+1(3.39)	+1(54.87)	+1(~80)	0.61	0.173
9	-1.68(1.0)	0(40.00)	0(50)	0.1	0.144
10	+1.68(4.0)	0(40.00)	0(50)	0.67	0.103
11	0(2.5)	-1.68(15.00)	0(50)	0.11	0.109
12	0(2.5)	+1.68(65.00)	0(50)	0.15	0.11
13	0(2.5)	0(40.00)	-1.68(0)	0.41	0.16
14	0(2.5)	0(40.00)	+1.68(100)	0.31	0.138
15	0(2.5)	0(40.00)	0(50)	0.49	0.199

$$Y_{1p} = 0.49 + 0.17A + 0.012B - 0.012C + 0.040AB - 0.037A^2 - 0.13B^2 - 0.046C^2 + 0.078A^2B - 0.029AB^2 + 0.070A^2B^2 \quad (1)$$

$$Y_{2p} = 0.20 - 0.012A + 0.003B - 0.004AB + 0.009AC - 0.027A^2 - 0.032B^2 - 0.018C^2 + 0.033A^2B - 0.004AB^2 + 0.038A^2B^2 \quad (2)$$

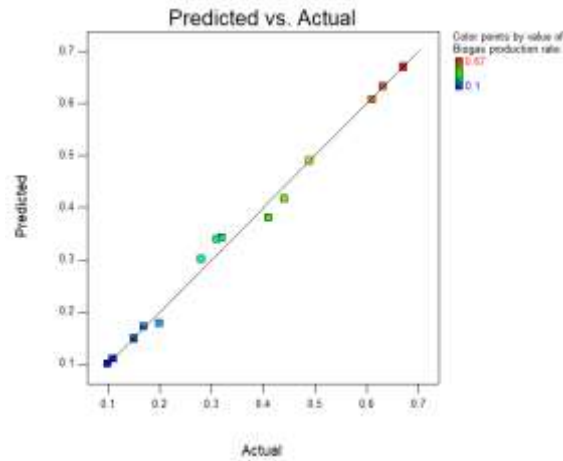
در این روابط  $Y_{1p}$  و  $Y_{2p}$  به ترتیب مقادیر تخمین زده شده نرخ تولید بیوگاز و راندمان تولید بیوگاز، A نرخ بارگذاری مواد آلی، B دما و C رژیم هم زدن می باشد. A، B و C مقادیر کد شده متغیرهای مستقل در مدل می باشند.

جدول ۲-۳- نتایج آماری آنالیز واریانس برای مدل های سطح پاسخ

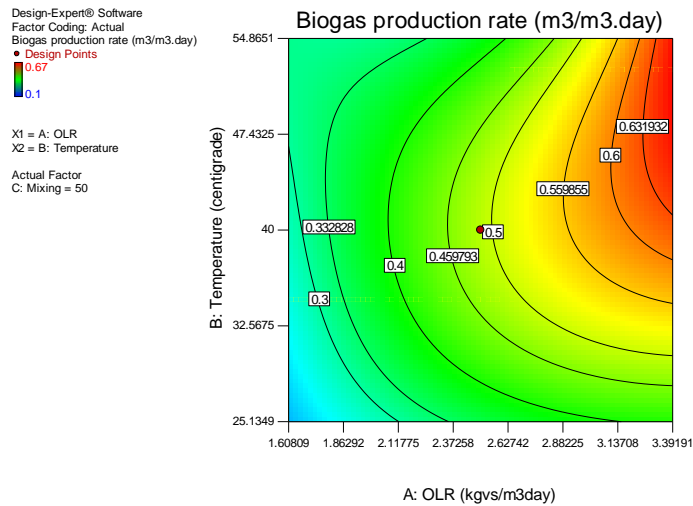
Statistical result	$Y_{1p}$	$Y_{2p}$
Model F-value	23.93	293.15
Model p-Value	< 0.0408	< 0.0457
Lack of fit F-value	6.55	11.71
Lack of fit p-Value	0.1003	0.0255
R-Squared	0.9931	0.9997
Adj R-Squared	0.9516	0.9963
Std. Dev	0.043	0.0023
C.V%	12.85	1.57
Adeq precision	14.180	56.629



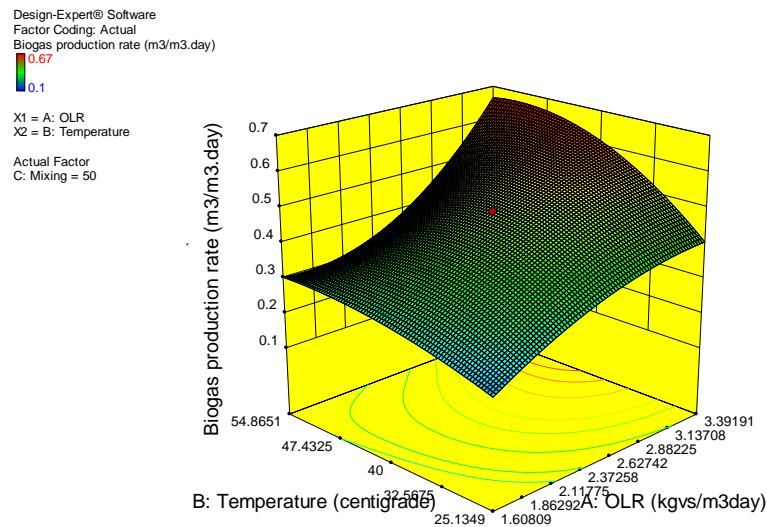
# یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



شکل ۱- مقادیر واقعی نرخ تولید بیوگاز در مقابل مقدار تخمین زده شده آن



(a)



(b)

شکل ۳۲- (a) شکل کانتور و (b) شکل سطح پاسخ برای تاثیر دما و OLR بر روی نرخ بیوگاز تولیدی در دور همزن ۵۰rpm



## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



### ۳-۳- اثر نرخ بارگذاری مواد آلی روی پاسخها

مطابق طراحی آزمایش صورت گرفته، نرخ بارگذاری مواد آلی در پنج سطح (۱، ۱/۶، ۲/۵، ۳/۴ و ۴ کیلوگرم ماده‌ی جامد فرار بر مترمکعب در روز) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش OLR به بالای  $2/5 \text{ kg vs. m}^3\text{d}^{-1}$ ، عملکرد راکتور در تولید روزانه‌ی بیوگاز بهتر شد (شکل ۳۲). اگرچه OLR بالا و محتوای بالای VS در خوراک ورودی باعث حساس‌تر شدن، رفتار نوسانی و دیر پایدار شدن راکتور گردید. چنین رفتاری در مطالعات گذشته گزارش شده است ([R. Alvarez & Lidén, 2009](#); [Hill & Bolte, 2000](#); [Salminen & Rintala, 2002](#)).

نتایج نشان داد نرخ بارگذاری مواد آلی به‌طور مستقیم بر عملکرد فرآیند هضم بی‌هوازی تأثیر می‌گذارد. پایین بودن نرخ بارگذاری (کمتر از  $1 \text{ kg vs. m}^3\text{d}^{-1}$ )، میکروارگانیسم‌ها را با کمبود مواد غذایی مواجه می‌کند، از طرفی دیگر، بارگذاری بیش از حد (بیشتر از  $4 \text{ kg vs. m}^3\text{d}^{-1}$ ) نیز به دلیل جذب محصولات اصلی و انتقال مواد سمی توسط فاز جامد، فعالیت تولید کنندگان اسید و متان را مختل می‌کند. در این صورت علی‌رغم افزایش تولید بیوگاز در ابتدای کار، پس از گذشت مدت زمانی به دلیل افزایش غلظت اسیدهای چرب فرار، تولید بیوگاز و متان کاهش می‌یابد ([Juanga, 2005](#)). مهم در مسیر متابولیسی تولید متان هستند و غلظت آن‌ها، میزان پایداری هاضم را نشان می‌دهد، در هاضم تجمع می‌یابند ([Bouallagui et al., 2003](#)). و باعث کاهش pH و وارد آمدن تنش بر کلیه‌ی میکروارگانیسم‌ها، مخصوصاً باکتری‌های متان‌زا می‌گردد ([Vavilin et al., 2007](#)). در صورت بالا رفتن غلظت اسید، با تلقیح دوباره، توقف موقت خوراک‌دهی، هم‌زدن، کاهش غلظت خوراک، افزودن آهک، بازگرداندن متناوب مایع هضم، خروج دوره‌ای مایع هضم و جایگزینی آن با آب، این مشکل قابل حل می‌باشد ([Juanga, 2005](#); [Vavilin et al., 2007](#)). ([Yadvika et al., 2004](#)).

با توجه به نتایج به‌دست آمده از هضم بی‌هوازی فضولات گاوی در تحقیق حاضر، نرخ بارگذاری مواد آلی (OLR) برای بازه‌ی دمایی  $20\text{C}-40\text{C}$ ، بین  $1/6$  تا  $2/5 \text{ kg vs. m}^3\text{d}^{-1}$  و برای بازه‌ی دمایی  $40\text{C}-55\text{C}$ ، بین  $2/5$  تا  $3/4 \text{ kg vs. m}^3\text{d}^{-1}$  پیشنهاد می‌شود. در منابع نیز نرخ بارگذاری مورد استفاده بر حسب  $\text{kg vs. m}^3\text{d}^{-1}$  در شرایط مزوفیل  $6/4-0/4$  (مقدار بهینه  $2-0/8$ ) و در شرایط ترموفیل  $7/5-1$  (مقدار بهینه  $5-1/5$ ) گزارش شده است ([Spinosa & Vesilind, 2001](#)).

### ۳-۴- تاثیر رژیم هم‌زدن روی پاسخها

در تحقیق حاضر تاثیر پنج رژیم هم‌زدن ( $20$ ،  $50$  و  $80$  دور در دقیقه برای  $10$  دقیقه در هر  $2$  ساعت،  $100$  دور در دقیقه به‌طور پیوسته و بدون هم‌زدن) روی تولید بیوگاز بررسی شد. نتایج نشان داد هم‌زدن متناوب و با شدت کم، مقدار تولید بیوگاز و بازده آن را نسبت به حالت هم‌زدن پیوسته و حالت بدون هم‌زدن افزایش داد. از طرف دیگر، نتایج نشان داد درجات مختلف هم‌زدن ( $20$ ،  $50$  و  $80$  دور در دقیقه) در هم‌زدن متناوب تاثیر معنی‌داری روی تولید بیوگاز و عملکرد راکتور نداشت و مقدار بیوگاز تولیدی در سه شرایط ذکر شده یکسان بود. مشابه این نتایج، توسط تحقیقات صورت گرفته در گذشته گزارش شده است ([Kaparaju et al., 2008b](#); [Stroot et al., 2001](#); [Vavilin et al., 2007](#)). هم‌زدن متناوب و با شدت حداقل، علاوه بر یکنواخت کردن دمای محتویات راکتور، در تماس قراردادن توده‌ی زیستی و خوراک، کاهش اثر بازدارندگی محصولات و متابولیت‌های تولید شده و ترکیبات بازدارنده‌ی موجود در خوراک بر فعالیت میکروبی، جلوگیری از تشکیل لایه‌ی مواد معلق بر روی سطح (ایجاد کف) و رسوب جامدات سنگین تجزیه‌ناپذیر در کف راکتور، توزیع یکنواخت میکروارگانیسم‌ها، کاهش اندازه‌ی ذرات و خارج کردن بیوگاز تولید شده از مخلوط ([Spinosa & Vesilind, 2001](#)), این امکان را فراهم می‌کند که جمعیت میکروبی در داخل راکتور بیشتر شود. اگر یک یا دو ساعت قبل از خوراک‌دهی، عمل هم‌زدن متوقف شود مواد جامد سنگین‌تر در کف راکتور رسوب کرده و جمعیت میکروبی در آن‌جا بیشتر خواهد شد. در واقع در این حالت زمان ماند جامدات از زمان ماند هیدرولیکی آبیتر می‌شود ([Kaparaju et al., 2008a](#)) (SRT>HRT).

<sup>1</sup>Overload

<sup>2</sup>Solid retention time

<sup>3</sup>Hydrilic retention time



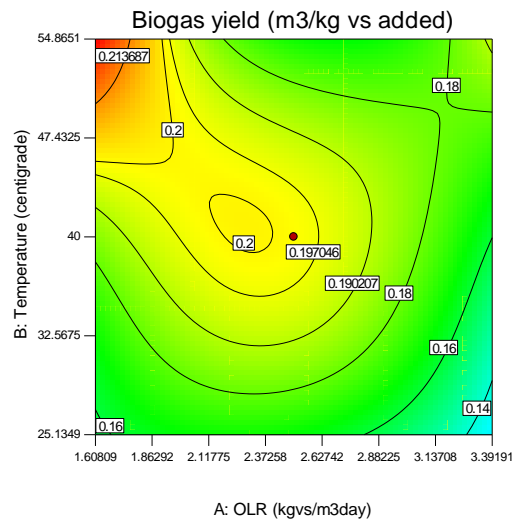
# یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
Biogas yield (m<sup>3</sup>/kg vs added)  
● Design Points  
0.231  
0.103

X1 = A: OLR  
X2 = B: Temperature

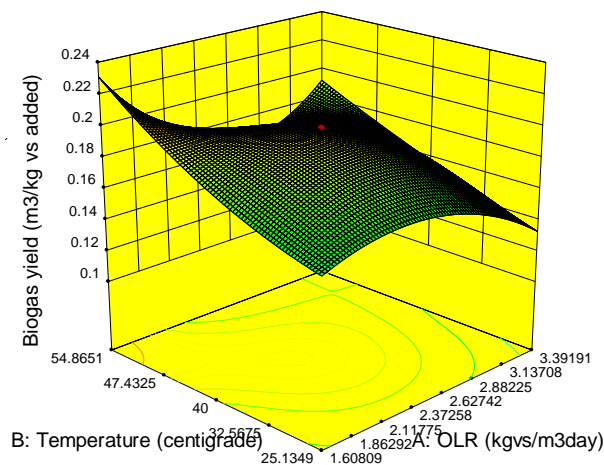
Actual Factor  
C: Mixing = 50



Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
Biogas yield (m<sup>3</sup>/kg vs added)  
● Design Points  
0.231  
0.103

X1 = A: OLR  
X2 = B: Temperature

Actual Factor  
C: Mixing = 50



شکل ۳۳- (a) شکل کانتور و (b) شکل سطح پاسخ برای تاثیر دما و OLR بر روی بازده بیوگاز در دور همزن ۵۰rpm

## ۴- نتیجه گیری

بهترین مدل برای بیوگاز تولیدی و بازده آن، مدل درجه دوم به دست آمد. نتایج آنالیز واریانس برای مدل‌های سطح پاسخ نشان داد که مقادیر ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای روابط درجه دوم بالا است، این امر حاکی از این است که این روابط، فرآیند را در محدوده‌ی تغییرات مورد نظر به خوبی توصیف می‌نمایند. با توجه به نتایج ارائه شده کاملاً واضح است که فرآیند هضم بی‌هوازی به شدت وابسته‌ی دما می‌باشد. افزایش دما از ۲۵°C به ۴۰°C یا کاهش آن از ۶۵°C به ۵۵°C تاثیر مثبت بر روی نرخ تولید بیوگاز و بازده آن دارد. بنابراین بهترین دما برای نرخ تولید بیوگاز و بازده متان حداکثر، دمای نزدیک به ۴۰°C و ۵۵°C می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از هضم بی‌هوازی فضولات گاوی در تحقیق حاضر، نرخ بارگذاری مواد آلی (OLR) برای بازه‌ی دمایی ۲۰°C-۴۰°C، بین ۱/۶ تا ۲/۵ kg vs.m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup> و برای بازه‌ی دمایی ۴۰°C-۵۵°C، بین ۲/۵ تا ۳/۴ kg vs.m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup> پیشنهاد می‌شود. هم‌زدن با شدت حداقل و به‌طور متناوب برهم‌کنش‌های برخورد تغذیه‌ای و تولید متان را در فرآیند هضم بی‌هوازی نسبت به حالت هم‌زدن پیوسته و حالت بدون هم‌زدن بهبود بخشید.



## References

- Ahring, B. K., Ibrahim, A. A., & Mladenovska, Z. (2001). Effect of temperature increase from 55 to 65 degrees C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure. *Water Research*, 35(10), 2446-2452. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00526-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00526-1)
- Alvarez, R., & Lidén, G. (2008). The effect of temperature variation on bimethanation at high altitude. *Bioresource Technology*, 99(15), 7278-7284. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.055>
- Alvarez, R., & Lidén, G. (2009). Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 527-533.
- Anderson, M. J., & Whitcomb, P. J. (2015). *DOE simplified: practical tools for effective experimentation*: CRC Press.
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. *Water Research*, 28(3), 727-731. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90153-8](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(94)90153-8)
- APHA, AWWA, & WPCF. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington DC: American Public Health Association.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781. doi:10.1016/j.pecs.2008.06.002
- Baş, D., & Boyacı, İ. H. (2007). Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 836-845.
- Baş, D., & Boyacı, İ. H. (2007). Modeling and optimization II: Comparison of estimation capabilities of response surface methodology with artificial neural networks in a biochemical reaction. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 846-854. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.025>
- Bouallagui, H., Ben Cheikh, R., Marouani, L., & Hamdi, M. (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*, 86(1), 85-89.
- Bouallagui, H., Haouari, O., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., Marouani, L., & Hamdi, M. (2004). Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*, 39(12), 2143-2148. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2003.11.022>
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., & Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*, 40(3), 989-995.
- Cao, Y., & Pawłowski, A. (2012). Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1657-1665. doi:10.1016/j.rser.2011.12.014
- Cheng, J. (2010). *Biomass to renewable energy processes* (first ed.): CRC Press Inc.
- Collins, A. R., Murphy, J., & Bainbridge, D. (2000). Optimal loading rates and economic analyses for anaerobic digestion of poultry waste. *J Air Waste Manag Assoc*, 50(6), 1037-1044.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction* (first ed.): Wiley-VCH.
- Divya, D., Gopinath, L. R., & Merlin Christy, P. (2015). A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. *Renew Sustain Energy Rev*, 42(0), 690-699. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.055>
- Gerardi, M. H. (2003). *Wastewater microbiology series: The microbiology of anaerobic digesters*. United States, America: John Wiley & Sons, Inc.
- Guo, J., Dong, R., Cheng, H., Clemens, J., & Pang, C. (2011). Effect of temperature and organic loading rates on anaerobic digestion of pig manure. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(12), 217-222.
- Hackett, C., Williams, R., Durbin, T., Welch, W., Pence, J., Jenkins, B., . . . Salour, D. (2004). Evaluation of conversion technology processes and products. *Draft Final Report. Integrated Waste Management Board. State of California*.
- Hansen, K. H., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1998). Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia. *Water Research*, 32(1), 5-12.
- Hill, D., & Bolte, J. (2000). Methane production from low solid concentration liquid swine waste using conventional anaerobic fermentation. *Bioresour Technol*, 74(3), 241-247.
- Juanga, J. P. (2005). Optimizing Dry Anaerobic Digestion of Organic of Municipal Solid Waste. *Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development, Thailand*.
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., & Angelidakia, I. (2008a). Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresour Technol*, 99(11), 4919-4928.
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., & Angelidakia, I. (2008b). Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*, 99(11), 4919-4928.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., & Al-Dahhan, M. H. (2005). Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing. *Bioresource Technology*, 96(16), 1771-1781. doi:10.1016/j.biortech.2005.01.020





یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک  
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



Buali Sims University

- Karim, K., Hoffmann, R., Thomas Klasson, K., & Al-Dahhan, M. H. (2005). Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Water Research*, 39(15), 3597-3606. doi:10.1016/j.watres.2005.06.019
- Khanal, S. K. (2008). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and Applications*: A John Wiley & Sons, Ltd. Publication, USA.
- Mähnert, P., & Linke, B. (2008). Kinetic study of biogas production from energy crops and animal waste slurry: Effect of organic loading rate and reactor size. *Environmental Technology*, 30(1), 93-99. doi:10.1080/09593330802246640
- Mason, R. L., Gunst, R. F., & Hess, J. L. (2003). *Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science* (second ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2008). *Design and analysis of experiments*. New York: John Wiley & Sons.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2009). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments* (Vol. 705): John Wiley & Sons.
- Poulsen, T. (2003). Anaerobic digestion, Solid Waste Management. *Aalborg University, Denmark*.
- Salminen, E. A., & Rintala, J. A. (2002). Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. *Water Research*, 36(13), 3175-3182.
- Sötemann, S. W., Ristow, N. E., Wentzel, M. C., & Ekama, G. A. (2005). A steady state model for anaerobic digestion of sewage sludges. *Water SA*, 31(4), 511-528.
- Spinosa, L., & Vesilind, P. A. (2001). *Sludge into biosolids: Processing, disposal, utilization*: International Water Assn.
- Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie, R. I., & Raskin, L. (2001). Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. digester performance. *Water Res*, 35(7), 1804-1816. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00439-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00439-5)
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., Metcalf, & Eddy, I. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York, USA: McGraw-Hill Education.
- Terashima, M., Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H., Takahashi, H., Li, Y., & Noike, T. (2009). CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, 100(7), 2228-2233. doi:10.1016/j.biortech.2008.07.069
- Vavilin, V. A., Lokshina, L. Y., Flotats, X., & Angelidaki, I. (2007). Anaerobic digestion of solid material: Multidimensional modeling of continuous-flow reactor with non-uniform influent concentration distributions. *Biotechnology and Bioengineering*, 97(2), 354-366.
- Wang, C., Chang, C., Chu, C., Lee, D., Chang, B.-V., Liao, C., & Tay, J. (2003). Using filtrate of waste biosolids to effectively produce bio-hydrogen by anaerobic fermentation. *Water Research*, 37(11), 2789-2793.
- Wang, Q., Kuninobu, M., Ogawa, H. I., & Kato, Y. (1999). Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 16(6), 407-416.
- Xie, S., Wickham, R., & Nghiem, L. D. (2017). Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 116, 191-197. doi:10.1016/j.ibiod.2016.10.037
- Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource Technology*, 95(1), 1-10. doi:10.1016/j.biortech.2004.02.010
- Zaher, U., Cheong, D.-Y., Wu, B., & Chen, S. (2007). Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste. *Department of Biological Systems Engineering, Washington State University*.
- Zeeman, G., Wiegant, W., Koster-Treffers, M., & Lettinga, G. (1985). The influence of the total-ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure. *Agr Wastes*, 14(1), 19-35.