

مطالعه سه نوع هاضم بی‌هوازی آزمایشگاهی جهت آزمون شرایط مؤثر بر تولید زیست‌گاز

وحید جهانگیری بلطاقی^۱، محسن سلیمانی^{۲*}، محمدجواد شیخ‌داوودی^۳ و ذبیح‌الله مهدوی‌فر^۴

چکیده

تولید و استفاده از زیست‌گاز (Biogas)، به‌عنوان یک سوخت تجدیدپذیر جایگزین، می‌تواند به کاهش استفاده از انرژی‌های فسیلی و به دنبال آن کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از این انرژی‌های فسیلی بیانجامد و باعث افزایش امنیت انرژی شود. تولید زیست‌گاز تابع شرایط خاصی است و از پارامترها و شاخص‌های زیادی از جمله اسیدیته، زمان ماند، دما، شدت هم‌زدن و ... تأثیر می‌پذیرد. وجود یک هاضم آزمایشگاهی برای کنترل و تشخیص بهترین شرایط، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ از این‌رو در این پژوهش سه طرح اولیه برای ساختمان هاضم بی‌هوازی با در نظر گرفتن مزایا و معایب انواع هاضم‌ها، عوامل مؤثر بر تولید زیست‌گاز و در نظر گرفتن هزینه ساخت هاضم، برای هضم پسماندهای مایع، ساخته شدند. در این هاضم‌ها، امکان کنترل پارامترهای مؤثر در تولید زیست‌گاز (دما، همزن، اسیدیته، غلظت و زمان ماند مواد) فراهم بود؛ همچنین به سامانه‌ای برای اندازه‌گیری مقدار گاز تولید شده مجهز شده بودند. این هاضم‌ها از نوع ناپیوسته بوده و امکان اجرای طرح‌های آزمایشی، برای مطالعه اثر پارامترهای مؤثر بر تولید زیست‌گاز، پیش‌بینی شد. هاضم‌های ناپیوسته نسبت به هاضم‌های پیوسته برای آزمایش موادی که نیاز به زمان ماند بالاتری دارند، از جمله زیست‌توده لیگنوسلولزی مناسب‌تر هستند. همچنین با توجه به بدنه شفاف این هاضم‌ها، امکان مطالعه تیمارهای نوری نیز وجود داشت. مهم‌ترین و مشکل‌ترین بخش ساخت، آب‌بندی درزها بود. از مقایسه سه هاضم ساخته شده، در صورت امکان آب‌بندی مناسب، می‌توان به این نتیجه دست یافت که هاضم شیشه‌ای بهترین نوع هاضم بوده و تقریباً همه الزامات موردنیاز برای آزمون مؤلفه‌های تأثیرگذار بر تولید زیست‌گاز را فراهم می‌کند؛ اما مشکل اصلی آن، امکان نشت هوا و نفوذ مایع و اتصال و سوختن الکتروموتور است. به‌دلیل انعطاف‌پذیری بدنه هاضم‌های پلی‌اتیلنی، امکان بی‌هوازی کردن این نوع هاضم به راحتی امکان‌پذیر بود، در صورتی که نیاز به هم‌زدن دستی یا مغناطیسی و خطای احتمالی در اندازه‌گیری حجم گاز تولیدی از عیوب آن محسوب می‌شود. استفاده از ارلن خلاء، درپوش لاستیکی، نیدل و هپارین لاک، به بهترین شکل ممکن، ملزومات موردنیاز یک هاضم بی‌هوازی را فراهم کرد اما هم‌زنی در این طرح نیز به‌صورت دستی یا با استفاده از همزن مغناطیسی صورت گرفت.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری گاز، تولید زیست‌گاز، هضم بی‌هوازی، هاضم ناپیوسته.

ارجاع: جهانگیری بلطاقی و سلیمانی م. شیخ‌داوودی م. ج. و مهدوی‌فر ذ. ۱۳۹۹. مطالعه سه نوع هاضم بی‌هوازی آزمایشگاهی جهت آزمون شرایط مؤثر بر تولید زیست‌گاز. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۹(۱): ۱۲۵-۱۳۵.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- دانشیار گروه شیمی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: m.soleymani@scu.ac.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰

مقدمه

جهت تولید بهینه زیست‌گاز، لازم است شرایط مؤثر پیرامون هاضم، کنترل‌شده و پارامترهای اثرگذار بر کمیت و کیفیت تولید، در محدوده مناسبی قرار گیرند. همچنین مواد خام اولیه که به‌عنوان خوراک هاضم استفاده می‌شوند، باید ترکیب مناسبی داشته باشند. با توجه به ابعاد بزرگ هاضم‌های تجاری و مزرعه‌ای، بهتر است که ترکیب بهینه مواد خام و دامنه مناسب پارامترها، در شرایط آزمایشگاهی و در ابعاد کوچک به دست آیند (Igoni, 2006). هضم مواد به‌صورت مجزا (ناپیوسته) و یا مداوم (پیوسته) می‌تواند انجام شود. هدف اصلی یک هاضم بی‌هوازی آزمایشگاهی، امکان کنترل عوامل مؤثر بر تولید زیست‌گاز، بررسی اثرات آنها بر عملکرد تولید و در نهایت به دست آوردن ایده‌آل‌ترین شرایط است. بنابراین باید شرایطی ایجاد شود تا بتوان پارامترها و شرایط مؤثر بر تولید گاز را مطالعه کرد و قطعاً لازمه این کار امکان ایجاد دامنه‌ای از پارامترهای مورد مطالعه است. با توجه به این الزامات و همچنین با توجه به تحقیقات پیشین، طرح‌هایی برای سامانه هاضم در نظر گرفته شده و ساخته شدند و در نهایت با توجه به تجارب کسب شده، معایب و محاسن هر کدام به دست آمدند.

انواع هاضم

هاضم‌ها را با توجه به ویژگی‌های آنها از قبیل نوع تغذیه، دمای هضم، حالت خوراک و ... تقسیم‌بندی می‌کنند (جدول ۱). مزایا، معایب و موارد استفاده از انواع هاضم‌ها در جدول ۲ آمده است. البته باید توضیح داده شود که موارد ذکر شده در جدول ۱ و جدول ۲ مربوط به هاضم‌های تجاری هستند در حالی که موضوع این مقاله، هاضم آزمایشگاهی است. هدف نهایی هاضم آزمایشگاهی، فراهم کردن محیط بی‌هوازی در چندین واحد، برای آزمایش و کنترل عوامل مؤثر در تولید زیست‌گاز است. این واحدها باید به درجه ورود مواد اولیه، لوله خروج گاز و سامانه همزن مجهز باشند. امکان کنترل و ثابت نگه‌داشتن دما و همچنین امکان اندازه‌گیری اسیدیته (pH) ضروری است. همچنین در همه نقاطی که امکان نشت آب و یا گاز، به بیرون از هاضم و یا امکان ورود هوا به درون هاضم وجود دارد، باید آب‌بندی مناسبی انجام شود تا فضای بی‌هوازی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی فراهم شود. مسأله دیگر، امکان اندازه‌گیری مقدار گاز تولیدی

در سال‌های اخیر با توجه به مشکلات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، محدودیت منابع فسیلی، امنیت انرژی و همچنین نوسانات قیمت نفت، توجه جهانی به منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش یافته است (Morales et al., 2014). یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر که پتانسیل تحقیقاتی و عملیاتی بالایی دارد، زیست‌گاز است. مسیر استخراج زیست‌گاز که یک مسیر جذاب و مطمئن برای استفاده از زیست‌توده به‌عنوان منبع تجدیدپذیر سوخت است، طیف گسترده‌ای از تحقیقات در این زمینه را به خود معطوف کرده است (Chandra & Gupta, 1997). در حال حاضر، دستاورد بزرگ استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی است. در این رابطه، فرآیند هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی، یک فناوری مهم است که ضمن کاهش آلاینده‌های ناشی از این مواد آلی، محصولی با ارزش حرارتی بالا (متان، ۴۲/۸-۳۵/۲ مگاژول بر متر مکعب) تولید می‌کند. از آنجا که منابع اولیه هضم‌شده برای تولید این نوع گاز، گیاهانی بوده‌اند که در طول رشد خود، مصرف‌کننده دی‌اکسیدکربن هستند، احتراق این گاز موجب افزایش مقدار گازهای گلخانه‌ای در جو نمی‌شود (Belhadj et al., 2013).

با وجود استفاده از مدل‌های مختلف هاضم‌های آزمایشگاهی در مراکز تحقیقاتی، تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه طراحی این هاضم‌ها انجام شده است. بررسی پیشینه تحقیقات مربوطه نشان می‌دهد که در صورت توجه ویژه به پارامترهای تغذیه مواد به درون هاضم و تأمین هزینه لازم، استفاده از هاضم مداوم و دو مرحله‌ای با قابلیت هم‌زنی به‌وسیله پمپاژ مجدد، علاوه بر کوتاه کردن زمان ماند مواد درون هاضم، راندمان عملی تولید زیست‌گاز را نیز افزایش می‌دهد (Kendi et al., 2012). همچنین بررسی معادلات تولید زیست‌گاز با توجه به تولید عملی نشان داد که با استفاده از هاضم ناپیوسته، تعداد متغیرهای مؤثر در طراحی کاهش می‌یابد که در صورت صرف زمان کافی در تحقیقات، موجب سهولت ساخت هاضم می‌شود (Igoni & Harry, 2017). سابقه استفاده از بتن یکپارچه و لایه‌های پلی‌اتیلن به‌عنوان عایق، در هاضم تجاری، به ویژه در مناطق سردسیر وجود دارد (Hajiaghaalizadeh et al., 2012).

شود. اما چنانچه هدف تولید تجاری زیست‌گاز از پسماندهای مایع است، استفاده از هاضم‌های مداوم و چند مرحله‌ای و صعودی مناسب‌تر است (Nizami *et al.*, 2013).

است، بنابراین طراحی سامانه‌ای برای اندازه‌گیری مقدار گاز تولیدی لازم است. نتایج حاصل از تحقیقات و آزمایش‌های انجام‌شده، نشان می‌دهد برای تولید زیست‌گاز در حجم پایین پسماندهای مایع، بهتر است از هاضم‌های ناپیوسته و صعودی استفاده

جدول ۱- دسته‌بندی کلی انواع هاضم‌ها (Nizami *et al.*, 2013)

انواع هاضم‌ها	اساس دسته‌بندی
پیوسته و ناپیوسته	تغذیه هاضم
پایین دمایی، میان دمایی و فرادمایی	دمای هضم
خشک و مرطوب	حالت فیزیکی مواد
تک‌فاز و چندفاز	طراحی مخزن هاضم
یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و چند مرحله‌ای	دفعات هضم
مزرعه‌ای، تجاری و آزمایشگاهی	ابعاد هاضم

جدول ۲- مزایا و معایب انواع هاضم‌های بی‌هوازی پراستفاده (Nizami & Murphy, 2010; Vandevivere *et al.*, 2003)

معایب	مزایا	نوع هاضم
زمان ماند زیاد	طراحی و مدیریت ساده	یک مرحله‌ای
تشکیل تخاله غلیظ	کم بودن زمان ماند	دو مرحله‌ای
ساختار پیچیده و پرهزینه	تغذیه ثابت برای تولید مشخص	هاضم خشک
نیاز به جداسازی فازهای جامد و مایع برای مرحله دوم هضم	مدیریت ساده و با ثبات	هاضم تر
فرآیند پیچیده و گران‌قیمت	امکان نگهداری طولانی مواد	
نیاز به پیش‌فرآوری مواد ورودی	سادگی کنترل تغذیه	
دشواری مخلوط‌کردن	فرآیند ثابت و مشخص	
تشکیل تخاله در حین هضم	قابلیت مهار بسیاری از موانع به وسیله مخلوط‌کردن مواد با آب	
مصرف آب و انرژی زیاد		
فرآیند کوتاه		
حساس به تغییرات کوچک	عدم نیاز به پمپاژ و هم‌زدن مداوم	هاضم ناپیوسته
گرفتگی در مسیر فرآیند	کم‌بودن فرآیندهای مکانیکی	هاضم مداوم
ابعاد زیاد هاضم	هزینه ساخت کم	
تولید کم گاز	طراحی و کاربرد ساده	هاضم صعودی
اسیدی‌شدن محیط هضم	هزینه ساخت کم	
	امکان نگهداری طولانی مواد	
نیاز به زمان زیاد برای راه‌اندازی مجدد	سادگی کنترل تغذیه	
	هزینه ساخت کم	
گرفتگی مسیرها در صورت کم‌بودن حجم تغذیه	عدم نیاز به هدایت مواد	

مساله در طراحی هاضم‌ها، جریان ورود و خروج مواد است (Kendi *et al.*, 2012) که هاضم ناپیوسته این نگرانی را ندارد. همچنین در صورت طراحی و ساخت با دقت کافی، یک مرحله هضم، اثر ترکیب مواد و پارامترها را به خوبی مشخص می‌نماید (Kafle *et al.*, 2013). مرطوب یا

با هدف طراحی هاضم آزمایشگاهی و در نظر گرفتن مزایا و معایب انواع هاضم‌ها، می‌توان گفت بهترین انتخاب استفاده از یک هاضم یک مرحله‌ای ناپیوسته و مرطوب (تر) است. استفاده از هاضم ناپیوسته، در عین سادگی کارایی مناسبی نیز دارد (Xie *et al.*, 2011). پیچیده‌ترین

داد (Igoni *et al.*, 2008).

در هاضم ناپیوسته، دو شکل اتلاف عمده گرما وجود دارد: ۱- اتلاف از طریق بدنه هاضم (Tchobanoglous *et al.*, 2003) و ۲- اتلاف از طریق لوله‌ها و اتصالات تأمین آب گرم (Reynolds & Richards, 1996). از این‌رو ترجیح داده می‌شود منبع تأمین گرما تا حد امکان به مخازن نزدیک باشد. به همین دلیل جهت تأمین گرما، بهتر است از گرمکن الکتریکی میله‌ای، مستقیماً برای هر یک از مجموعه‌های هاضم (حمام آب گرم) استفاده شود تا هر مجموعه درون یک حمام آب گرم، گرمای یکنواختی را دریافت کنند. به‌منظور ایجاد جریان همرفتی مناسب، باید گرمکن‌ها در نزدیکی کف حمام‌ها قرار بگیرند و حجم حمام به گونه‌ای انتخاب شود که فضای کافی برای مخازن و اتصالات آن‌ها، گرمکن و جریان گرما وجود داشته باشد؛ همچنین جهت کنترل دمای حمام آب گرم، از ترموستات با دقت کافی و متناسب با فاصله مقادیر فاکتور دما استفاده شود. به‌منظور پاسخ‌دهی سریع‌تر ترموستات، حسگر آن در نزدیک‌ترین محل ممکن به گرمکن قرار گرفته و تنظیم و کالیبراسیون ترموستات با توجه به دمای درون مخازن انجام می‌شود. در آزمون‌های به عمل آمده مشخص شد به‌دلیل تاخیر زمانی انتقال گرما، خطای عملی ترموستات تأثیر کمی بر تغییرات دمای درون مخازن دارد.

هرچه زمان توقف مواد در داخل هاضم بیشتر و دمای هضم نیز بالاتر باشد، مقدار استحصال زیست‌گاز زیادتر می‌شود. این مدت زمان در حقیقت فاصله میان زمان ورود حجم مشخصی از مواد به مخزن هضم و زمان خروج آن به شمار می‌آید (Li & Khanal, 2016). با توجه به ارتباط معکوس بین زمان ماند و دما، باید در طراحی توجه داشت که هاضم بتواند ثبات یا تغییر موردنظر در عوامل مؤثر را در طول زمان ماند فراهم نماید (Agunwamba, 2001). در واقع اثر زمان ماند بر طراحی، مربوط به همین تداوم فعالیت است. به‌عنوان مثال درزبندی اتصالات و مسیرها نباید با گذشت زمان دچار مشکل شود. آزمایشات نشستیابی نشان داد جهت درزبندی‌ها بهتر، انجام جوشکاری و استفاده از چسب‌های سیلیکونی و خمیر ماستیک مناسب است. جهت ثبات اولیه اتصالات نیز باید از چسب‌های سریع استفاده شود. در هاضم آزمایشگاهی، نیازی به تمهید خاصی برای اندازه‌گیری و کنترل زمان

خشک‌بودن هاضم، بیشتر در طراحی هاضم‌های مداوم مؤثر است ولی در هاضم آزمایشگاهی ناپیوسته، به‌منظور دستیابی به هزینه کمتر و کیفیت بیشتر اختلاط مواد، بهتر است هضم در حالت مرطوب انجام شود.

مواد و روش‌ها

در یک هاضم آزمایشگاهی باید امکان کنترل و مطالعه موارد مؤثر بر تولید زیست‌گاز وجود داشته باشد. بنابراین در ادامه ابتدا این شاخص‌ها و عوامل مرور شده و چگونگی تأمین این شرایط نیز بررسی می‌شود.

عوامل مؤثر بر طراحی هاضم و تولید زیست‌گاز

در مورد دامنه مناسب پارامترهای مؤثر بر تولید زیست‌گاز، تحقیقات بسیاری انجام شده است. این مقادیر برای پارامترهای اصلی در جدول ۳ آمده است.

کنترل دما

باکتری‌های متان‌زا برای فعالیت نیاز به گرما دارند. هاضم‌های بی‌هوازی در دمای ۲۰-۶۰ درجه سلسیوس کار می‌کنند. دو محدوده اصلی دمای تولیدکننده متان عبارتند از مزوفیلیک (۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس) و ترموفیلیک (۵۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس) که دمای بهینه این دو محدوده به ترتیب ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس است (Panigrahi & Dubey, 2019). طول دوره هضم با افزایش دما کاهش‌یافته و موجب صرفه‌جویی در وقت، فضا، ظرفیت هاضم، مواد سازنده هاضم، آب مصرفی و هزینه می‌شود این در حالی است که افزایش دما نیاز به صرف هزینه بیشتری دارد. از این رو شرایط میان‌دمایی (۴۵-۳۵ درجه سلسیوس) توصیه می‌شود (Mattocks, 1984). برای این که بتوان تیمار دمایی را مطالعه کرد، در ابتدا باید امکان دماهای مختلف در هاضم‌های مختلف فراهم آید و بعد از آن، بایستی از تغییرات دما در هر هاضم، جلوگیری به عمل آید. برای این‌کار بهترین راه عایق‌بندی محیط هضم است. در هاضم‌های تجاری می‌توان هاضم را به‌وسیله کاه و کلش محصولات کشاورزی، پشم شیشه و یا کاهگل عایق‌بندی کرد و یا عمل هضم را در یک گلخانه انجام داد تا بتوان دمای محیط را کنترل کرد (Saghafi, 1993). جهت ایجاد گرمای یکنواخت موردنیاز هاضم آزمایشگاهی، می‌توان هاضم را درون حمام آب گرم قرار

هر مقدار زمان ماند بیشتر باشد باید حجم هاضم نیز به همان نسبت، بیشتر در نظر گرفته شود اما در هاضم‌های ناپیوسته چون ورود یا خروج مواد خام را نداریم، حجم، شاخص محدودکننده‌ای نیست.

ماند نیست. زمان ماند در هر تیمار، از زمان شروع آزمایش، آغاز شده و تا روزی که تولید روزانه زیست‌گاز کمتر از یک درصد از تولید تجمعی گاز تا آن روز باشد، ادامه می‌یابد. قطعاً آن تیماری که به زمان ماند کوتاه‌تری بیانجامد، تیمار بهتری خواهد بود. در هاضم‌های پیوسته،

جدول ۳- دامنه مناسب پارامترهای اصلی اثرگذار بر میزان تولید زیست‌گاز

پارامتر مؤثر	توضیحات	منبع
دما	۶۰-۲۰ °C مقدار بهینه در محدوده‌های مزوفیلیک و ترموفیلیک، ۲۵°C و ۳۵°C حداقل SRT مورد نیاز، ۴ روز	Panigrahi & Dubey (2019)
زمان ماند	محدوده SRT در آزمایشگاه از ۷۲ ساعت تا ۱۴ هفته HRT، بسته به نوع خوراک و دما، نباید کمتر از ۲-۴ روز باشد	Panigrahi & Dubey (2019)
pH	برای انجام هضم و زنده ماندن باکتری‌ها در محدوده ۵/۸ - ۷/۲	Igoni et al. (2008)
غلظت	جهت بستر فرآیند تولید زیست‌گاز، ۷-۹ درصد	Igoni et al. (2008)
نسبت کربن به نیتروژن (C/N)	برای تعادل در تغذیه و تولید مثل باکتری‌ها، ۲۰:۱-۳۰:۱، مقدار بهینه، ۲۵:۱	Panigrahi & Dubey (2019)
همزدن	مؤثرترین روش‌های همزنی، به ترتیب همزدن مکانیکی، نیوماتیکی و هیدرولیکی	Panigrahi & Dubey (2019)

کف مخزن متصل می‌شود (شکل ۲- شماره ۵) و برای اطمینان از عدم نشست احتمالی گاز به بیرون و یا ورود هوا به محیط بی‌هوازی، به یک شیر قطع و وصل مجهز است (شکل ۲- شماره ۳). باید توجه شود در فرآیند نمونه‌برداری حالت بی‌هوازی هاضم، حفظ شود. همچنین در صورت نیاز می‌توان از این مسیر برای افزودن مواد کنترل‌کننده pH، به درون مخزن استفاده کرد.



شکل ۱- نحوه قرارگیری گرمکن و ترموستات درون حمام

غلظت

تأثیر تغییر میزان غلظت بر تولید زیست‌گاز، ناشی از تغییر محیط فعالیت باکتری‌هاست. افزایش غلظت مواد، موجب افزایش چسبندگی و مانع رشد باکتری‌ها می‌شود، و کاهش غلظت موجب لایه‌لایه شدن و در نتیجه ممانعت از فعالیت باکتری‌ها و خروج گاز از محلول شده که مستلزم همزدن مداوم محلول است (Chowdhry et al., 1994). کنترل غلظت بخشی از فرآیند پیش‌تیمار محسوب می‌شود و اهمیت آن در طراحی هاضم، مربوط به انتخاب نوع هاضم با توجه به غلظت در نظر گرفته شده است که پیش‌تر به آن اشاره شد. آنچه که در رابطه با غلظت مواد، اهمیت پیدا می‌کند، غلظت اولیه مواد است که باید قبل از ورود این مواد به درون مخزن هضم کنترل شود. بنابراین همانند آنچه در مورد زمان ماند گفته شد، در هاضم

زمان ماند

کنترل pH

پایین آمدن pH باعث اختلال در فعالیت باکتری‌های متان‌زا شده و تولید گاز متان را متوقف می‌کند. از طرفی افزایش pH کاهش درصد متان موجود در زیست‌گاز را به دنبال خواهد داشت (Baier & Schmidheiny, 1997). در آزمایشات، بهتر است pH را روزانه کنترل کرد، زیرا تداوم حالت اسیدی یا بازی در خوراک هاضم، حتی امکان دارد هضم را کاملاً متوقف کند (Aili et al., 1991). از این رو لازم است که در هاضم، یک مسیر نمونه‌برداری از مواد در حال هضم، در نظر گرفته شود. برای جلوگیری از نشست گاز، مسیر در نظر گرفته شده از درون مواد هضم گذشته و به

آزمایشگاهی نیازی به پیش‌بینی تمهیداتی برای کنترل غلظت وجود ندارد.

هم‌زنی

هدف از هم‌زنی این است که مواد مغذی به طور یکنواخت در سراسر حجم هاضم توزیع شود تا سوسپانسیونی از ذرات جامد و مایع ایجاد شود، از رسوب ذرات و ایجاد فوم جلوگیری و از توزیع یکنواخت گرما اطمینان حاصل شود، و همچنین امکان صعود گاز تولیدی از تخمیر مواد فراهم شود (Lemmer *et al.*, 2013). هم‌زدن باعث می‌شود تا باکتری‌ها تماس بیشتری با مواد در حال تخمیر پیدا کنند و در نتیجه، سرعت انجام واکنش‌ها بیشتر شود، همچنین از تشکیل یک لایه سخت بر روی مواد در حال هضم جلوگیری می‌کند که مانع متصاعد شدن گاز می‌شود (Agunwamba, 2001). بهتر است که عمل هم‌زدن، روزانه انجام گیرد و در طول روز دو یا سه مرتبه برای مدت چند دقیقه تمام حجم مخزن هم زده شود. البته در مخازن بزرگ این عمل به کمک یک موتور برقی انجام می‌شود ولی در دستگاه‌های کوچک، به طور دستی و به وسیله پروانه‌هایی که در دستگاه تعبیه شده است، صورت می‌گیرد (Adl, 2004). در مقیاس کوچک، عمل هم‌زنی می‌تواند دستی انجام شود. در مقیاس‌های بزرگ و در تصفیه‌خانه‌ها علاوه بر استفاده از همزن‌های مکانیکی، می‌توان از همزن‌های هیدرولیکی و پنوماتیکی استفاده نمود. (Mahmoodi-Eshkaftaki *et al.*, 2017). البته استفاده از همزن مغناطیسی، موجب سادگی طراحی و پیاده‌سازی این پارامتر می‌شود. با توجه به مرطوب بودن نوع هاضم و به‌منظور کاهش هزینه‌ها و قابلیت کنترل هم‌زنی به‌عنوان یک پارامتر مؤثر، می‌توان از الکتروموتورهای کوچک استفاده کرد. تست الکتروموتورها نشان داد استفاده از الکتروموتورهای ۱۲ ولتی دارای یاتاقان آب‌بند، برای تأمین نیروی هم‌زنی، اختلاط لازم را برای محلول زیست‌توده مایع ایجاد می‌کند. الکتروموتور مربوط به هر مخزن، بصورت عمودی در بالای آن قرار گرفت (شکل ۲- شماره ۱). جهت ایجاد اختلاط مناسب، از پره‌های هم‌زن مورب استفاده شد که در عمق میانه مخزن جا گرفت (شکل ۲- شماره ۷). لازم به توضیح است که بحث هم‌زنی بسیار پیچیده است و بسته به خصوصیات خوراک و حجم هاضم، از همزن‌هایی با خصوصیات متفاوت استفاده می‌شود. از

انواع همزن‌ها با شفت مایل یا مستقیم، قطر شفت زیاد یا کم، دور آهسته یا زیاد و یا ترکیبی از انواع همزن‌ها استفاده می‌شود (Lemmer *et al.*, 2013). با توجه به شکل قرارگیری روزنه‌های تهویه روی بدنه الکتروموتور (شکل ۲- شماره ۲) و همچنین به‌دلیل ارتعاش محور متحرک، یک شفت ثابت توخالی، پیرامون شفت متحرک میانی (همانند لوله بیرونی یک خودکار و لوله حاوی جوهر) قرار گرفت تا علاوه بر تأمین درزبندی، امکان جایگذاری الکتروموتور در فضای بیرونی مخزن فراهم شود (شکل ۲- شماره ۹). با توجه به امکان جرقه‌زنی در محفظه موتور، باید از نشت گاز به درون الکتروموتور و در نتیجه انفجار احتمالی، جلوگیری کرد، شفت توخالی استفاده‌شده، این امکان را فراهم می‌کند. فضای گاز تولید شده را در بالای مواد در حال هضم ایزوله کرده و از نشت آن به درون الکتروموتور و تخلیه آن جلوگیری می‌کند. در آزمون‌های نشت‌یابی واحد هضم مشخص شد که پس از گذشت چند روز، یاتاقان‌های آب‌بند الکتروموتور دچار نشت می‌شود. از این رو بهتر است با تخصیص هزینه بیشتر، از الکتروموتورهای مطمئن‌تر (همانند الکتروموتورهای مورد استفاده در ساخت ربات‌ها) استفاده شود. مشکلی که در برخی مواقع و در زمان تولید گاز زیاد (و در نتیجه، ایجاد فشار زیاد در بالای مخلوط در حال هضم) به وجود می‌آید، امکان بالا آمدن مایع از درون شفت توخالی و نفوذ آن، به درون الکتروموتور است. در این حالت، حتی سامانه اندازه‌گیری مقدار گاز تولیدی نیز به دلیل افت فشار احتمالی دچار خطا می‌شود. برای رفع این مشکل استفاده از مواد نیمه‌جامد (همانند گریس) که هم از نفوذ مایع به درون شفت جلوگیری کند و هم مانع چرخش شفت الکتروموتور نشود، توصیه می‌شود. بنابراین باید سطح مایع به طور مداوم کنترل شود. در حالتی که زیست‌توده آزمایشی مایع باشد، می‌توان از همزن دستی نیز استفاده کرد. راه حل مطمئن‌تر، استفاده از همزن مغناطیسی است. استفاده از همزن مغناطیسی مشکلات ناشی از نشت گاز یا مایع را مرتفع می‌کند اما نسبت به همزن مکانیکی هزینه اولیه بالاتری دارد. به‌دلیل امکان استفاده از همزن مغناطیسی و به‌منظور سهولت در ایجاد شرایط بی‌هوازی، استفاده از بطری‌های پلی‌اتیلن به‌عنوان مخزن هضم توصیه می‌شود. در این حالت، در شروع آزمایش، هوای درون مخزن به راحتی و با فشار بطری،

این جابجایی را به‌عنوان ملاک مقایسه و مؤلفه‌ی حجم تولید شده در نظر گرفت؛ مقدار حجم گاز تولید شده در شرایط استاندارد را با استفاده از قانون ظروف مرتبطه و با استفاده از رابطه بین حجم و فشار در گازها، می‌توان محاسبه کرد. در هاضم مورد بحث، جهت ایجاد سامانه اندازه‌گیری حجم، از یک مخزن با ظرفیت ۵۰ میلی‌لیتر استفاده شد. با افزایش فشار ناشی از تولید گاز، آب از مخزن مدرج (شکل ۲- شماره ۱۲) به لوله خروجی (شکل ۲- شماره ۱۳) رانده می‌شود؛ مقدار حجم آب جابه‌جاشده معرف حجم گاز تولیدی در فشار هاضم (فشار اتمسفر به علاوه اختلاف ارتفاع آب) است.

با توجه به این مسأله که در فرآیندهای اندازه‌گیری مؤلفه حجم زیست‌گاز، نمونه‌برداری و تخلیه گاز، اتصال لوله‌های مربوطه نیاز به تغییر حالت قطع و وصل دارند، باید از متصل‌کننده‌های فشاری گازی استفاده شود. البته به‌منظور کاهش هزینه سرهم‌بندی اتصالات می‌توان از لوله و شیلنگ‌های منعطف جهت اتصال به لوله‌های خشک استفاده نمود. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نشان داد با این روش هیچ‌گونه نشتی به‌وجود نمی‌آید.

ساخت هاضم‌ها، مزایا و معایب

در ابتدا براساس طرحواره شکل ۲-الف، و با توجه به مطالب گفته‌شده و الزامات یک هاضم آزمایشگاهی، یک هاضم شیشه‌ای با همزن مکانیکی و شیرهای ورودی و خروجی تعبیه‌شده در درب شیشه، ساخته شد (شکل ۲، ب). در صورت امکان آب‌بندی مناسب، این هاضم بهترین نوع هاضم بوده و همه الزامات موردنیاز برای آزمون مؤلفه‌های تأثیرگذار بر تولید زیست‌گاز را فراهم می‌کند. مشکل اصلی این طرح عدم آب‌بندی مناسب مجراهای روی درب و امکان نفوذ مایع (در صورت عدم تخلیه گاز، افزایش فشار درون هاضم و صعود مایع از درون لوله حاوی محور الکتروموتور) و احتمال اتصال و سوختن الکتروموتور بود. برای این طرح، در طول آزمایش هضم مواد، بارها مشکل نشتی پیش آمد.

راه حل مشکل هاضم اول، حذف همزن و کم‌کردن مجراهای ورودی به هاضم جهت کم‌کردن مشکلات آب‌بندی بود. بنابراین با به کارگیری بطری‌های پلی‌اتیلنی و حذف همزن، هاضم‌های پلی‌اتیلنی ساخته شدند (شکل ۳). هم‌زدن در این طرح به‌صورت دستی انجام شد. حسن

تخلیه‌شده و محیط بی‌هوازی تشکیل می‌شود. در این صورت باید تدبیری اندیشیده شود تا از امکان برگشت بدنه بطری در زمان تولید گاز جلوگیری شود و گازهای تولید شده به جای تجمع در فضای خالی احتمالی ایجادشده در بالای مخزن، به درون لوله سامانه اندازه‌گیری مقدار گاز هدایت شود تا این سامانه، برای اندازه‌گیری مقدار گاز، دچار خطا نشود.

سایر عوامل مؤثر

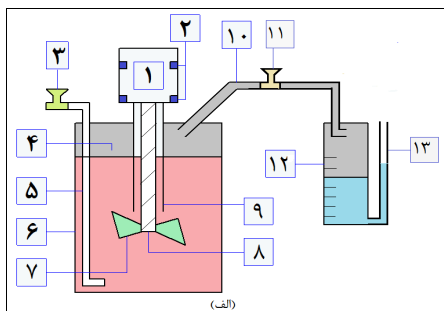
برخی از پارامترهای مؤثر بر تولید زیست‌گاز از جمله نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، ترکیب مواد آلی زیست‌توده، مواد سمی، و پتانسیل احیا در طراحی هاضم بی‌هوازی اثری ندارند. این پارامترها از طریق پیش‌تیمار کنترل می‌شوند.

جهت کنترل تیمارهای نوری نیز هاضم‌های با بدنه شفاف به کار گرفته‌شد تا امکان تیره‌کردن و سایه‌زدن بدنه هاضم جهت اعمال تیمارهای نوری وجود داشته‌باشد.

کنترل تولید گاز

تولید زیست‌گاز نیازمند گذر زمان است. در فرآیند آزمایشگاهی، کوتاه‌کردن زمان هضم مهم است. در فرآیند تولید، قبل از رسیدن به شرایط بی‌هوازی در درون مخزن، زمان زیادی صرف مصرف اکسیژن موجود در بالای مخزن می‌شود. از این‌رو پس از قرارگیری مواد در مخزن، می‌توان مقداری گاز ازت، از طریق لوله نمونه‌برداری pH، وارد مخزن کرد. سپس تمامی مسیرها بسته‌شده و شرایط بی‌هوازی ایجاد می‌شود. در صورت استفاده از بطری‌های پلی‌اتیلن به‌عنوان مخزن، می‌توان با فشردن بدنه بطری، هوای موجود در آن را به‌صورت دستی خارج کرد.

مهم‌ترین مسأله در کنترل تولید گاز، اندازه‌گیری حجم زیست‌گاز تولید شده است. خروجی گاز باید در قسمت بالایی هاضم (قسمتی که در بارگیری هاضم، خالی می‌ماند) تا جای ممکن نزدیک به سقف هاضم قرار گیرد (شکل ۲- شماره ۱۰). با توجه به این که زیست‌گاز، گاز کامل نیست، تنها راه اندازه‌گیری حجم تولید شده آن با خطای کم، استفاده از کنتور گاز است؛ ولی برای کاهش هزینه ساخت از سامانه جابجایی آب توسط گاز تولید شده استفاده می‌شود. با توجه به این که در هاضم آزمایشگاهی، هدف تعیین شرایط بهینه با مقایسه نتایج است، می‌توان



شکل ۲- الف) طرح‌واره یک واحد هاضم (۱) الکتروموتور هم‌زن، (۲) روزنه‌های تهویه الکتروموتور، (۳) شیر نمونه‌برداری مواد، (۴) سطح مواد درون مخزن، (۵) مسیر نمونه‌برداری مواد، (۶) بدنه مخزن، (۷) پروانه مورب هم‌زن، (۸) محور (شفت) متحرک هم‌زن، (۹) محور (شفت) ثابت هم‌زن، (۱۰) خروجی گاز، (۱۱) شیر نمونه‌برداری گاز، (۱۲) مخزن سامانه اندازه‌گیری (مدرج)، (۱۳) لوله خروج آب.



شکل ۳- هاضم پلی‌اتیلنی

این طرح این بود که به دلیل انعطاف‌پذیری بدنه هاضم، امکان بی‌هوازی کردن داخل هاضم در ابتدای شروع هضم، به راحتی و با فشردن هاضم ممکن بود. عیب آن نیز هم‌زدن دستی و مغناطیسی و خطای احتمالی در اندازه‌گیری حجم گاز تولیدی، به دلیل بادکردن هاضم‌ها در اثر تولید گاز و تغییر شکل هاضم است. مشکل نشت نیز کم‌کم، اما با شدت کمتری پابرجا بود.

طرح سوم، به کارگیری یک ارلن خلاء و استفاده از درپوش لاستیکی، نیدل و هیپارین لاک بود (شکل ۴). هم‌زنی در این طرح نیز به صورت دستی یا با استفاده از همزن مغناطیسی صورت می‌گیرد.

هر واحد هاضم، در واقع یک ارلن خلاء ۲۵۰ میلی‌لیتری است که ورودی آن با درپوش الاستیک مسدود شده است و قسمت خروجی آن با شیلنگ و شیرهای ۱/۲ اینچ آب‌بندی شده است. شیلنگ خروجی به یک مانومتر U شکل جهت اندازه‌گیری مقدار گاز وصل شد. برای نمونه‌گیری مایع و همچنین اضافه کردن مواد به درون هاضم و در عین حال، تداوم بی‌هوازی ماندن مواد داخل هاضم از سوزن‌هایی (نیدل) با قطر ۱/۲ میلی‌متری استفاده شد و جهت جلوگیری از ورود اکسیژن به داخل هاضم از طریق نیدل، از هیپارین لاک استفاده شد که داخل هیپارین لاک (صفربند) الاستیک مرتجع شده بکاررفته که بعد از خارج کردن نیدل نمونه‌گیری به حالت اولیه برمی‌گردد و از ورود اکسیژن به داخل هاضم جلوگیری می‌کند. برای اطمینان بیشتر از عدم وجود نشتی، همه نقاطی که امکان نشت داشتند با چسب قطره‌ای درزبندی شدند. این هاضم، بهترین شرایط عدم نشت و تداوم شرایط بی‌هوازی را فراهم کرد.



شکل ۴- الف) ارلن خلاء، (ب) درپوش الاستیکی، (ج) نیدل، (د) هیپارین لاک (صفربند انژیوکت)، (و) یک واحد کامل شده هاضم بی‌هوازی

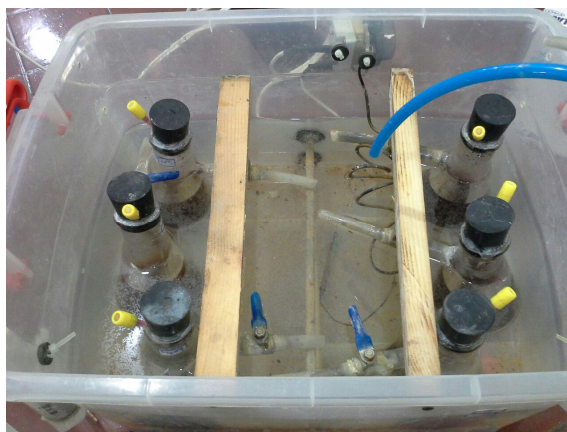
شکل کلی قرارگیری هاضم‌ها

هدف از طراحی هاضم آزمایشگاهی، ایجاد شرایطی کنترل‌شده جهت یافتن دامنه مناسب پارامترها و بهترین ترکیب خوراک مورد هضم است؛ در واقع تولید تجاری زیست‌گاز مدنظر نیست. با یافتن این شرایط بهینه، می‌توان انتظار داشت تولید زیست‌گاز در ابعاد تجاری با بیشترین مقدار و کیفیت انجام شود. از اینرو می‌توان گفت حالت مناسب وجود یک هاضم با قابلیت پیاده‌سازی طرح‌های آزمایشی است (Suanon et al., 2017). بر همین اساس هاضم بر اساس طرح کرت‌های خردشده با چهار کرت اصلی و بین ۴-۶ واحد (کرت فرعی) طراحی شد. با توجه به این که یکی از مهم‌ترین پارامترها در هاضم‌ها،

دما است و به‌منظور کنترل بهتر دما و همچنین کم‌کردن هزینه‌های ناشی از ابزارهای کنترل‌کننده دما، این پارامتر به‌عنوان عامل کرت اصلی در نظر گرفته شد. هر کرت اصلی در واقع یک حمام آب گرم است که در درون آن چند واحد هاضم قرار می‌گیرد. در خوراک مایع بهتر است ۸۰ درصد حجم هر هاضم توسط خوراک، پر شود (Anon, 2006) (شکل ۲، شماره ۴). در صورتی که عامل کرت فرعی pH باشد، پس از تخصیص تصادفی این عامل به واحدهای هضم (مخازن)، شکل کلی هاضم‌ها درون حمام آب، همانند شکل ۵ خواهد بود. شکل ۶، یک حمام آب گرم را به همراه شش واحد هاضم نشان می‌دهد.



شکل ۵- آرایش واحدهای هاضم مورد نظر و نمونه‌ای از نحوه تخصیص تیمارها (در یک تکرار)



شکل ۶- شکل نهایی هاضم‌ها درون یکی از حمام‌های آب گرم

برای تولید بیشترین مقدار گاز به دست آید. بررسی عوامل مؤثر بر تولید زیست‌گاز، موجب دستیابی به طراحی هاضم بی‌هوازی آزمایشگاهی شد. طرح این هاضم، با انتخاب هاضم از نوع ناپیوسته، طوری حاصل شد که بتواند امکان ایجاد تغییرات در پارامترهای مؤثر بر میزان و کیفیت تولید زیست‌گاز را تأمین نماید. همچنین این هاضم با

نتیجه‌گیری

هضم پسماندهای مایع، یکی از راه‌های کم‌کردن اثرات زیست‌محیطی ناشی از این پسماندها است. جهت بازدهی هرچه بیشتر هضم و تولید مقدار بیشتر و خالص‌تر زیست‌گاز، عوامل مؤثر بر آن باید در شرایط آزمایشگاهی بررسی شده و مورد آزمایش قرار گیرند تا بهترین شرایط

به دلیل انعطاف‌پذیری بدنه هاضم‌های پلی‌اتیلنی، امکان بی‌هوازی کردن این هاضم‌ها به راحتی وجود دارد. عیب آن نیز هم‌زدن دستی یا مغناطیسی و خطای احتمالی در اندازه‌گیری حجم گاز تولیدی است.

استفاده از ارلن خلاء، استفاده از درپوش لاستیکی، نیدل و هپارین لاک، به بهترین شکل ممکن، ملزومات موردنیاز یک هاضم بی‌هوازی را فراهم کرد اما هم‌زنی در این طرح نیز به صورت دستی یا با استفاده از هم‌زن مغناطیسی قابل انجام بود. مقایسه کلی این سه هاضم در جدول ۴ آمده است.

حداقل هزینه ممکن امکان اندازه‌گیری مؤلفه حجم تولید شده جهت مقایسه را تأمین کرده و شرایط تصفیه پسماندهای مایع را فراهم می‌کند.

در شرایطی که امکان فراهم کردن هاضم‌های استاندارد ساخته شده توسط شرکت‌های معتبر وجود ندارد، با امکانات حداقلی و به‌کارگیری خلاقیت، می‌توان هاضم‌های قابل اعتمادی را طراحی کرد. در صورت امکان آب‌بندی مناسب، هاضم شیشه‌ای هاضم مناسبی بوده و اکثر الزامات موردنیاز برای آزمون مؤلفه‌های تأثیرگذار بر تولید زیست‌گاز را فراهم می‌کند. مشکل اصلی آن، امکان نشت هوا و نفوذ مایع و اتصال و سوختن الکتروموتور است.

جدول ۴- مقایسه کلی سه نوع هاضم

ویژگی قابل کنترل	هاضم شیشه‌ای	هاضم پلی‌اتیلنی	هاضم ارلن
کنترل دما	مناسب	مناسب	مناسب
امکان آب‌بندی درزها	ضعیف	متوسط	خوب
امکان به‌کارگیری همزن	مکانیکی-مناسب	مکانیکی-متوسط	مکانیکی-متوسط
اندازه‌گیری گاز	هات‌پلت-مناسب	هات‌پلت-متوسط (به دلیل ارتفاع زیاد هاضم)	هات‌پلت-مناسب
توزیع مناسب گرما درون هاضم	مناسب	امکان خطا به دلیل امکان بادشدگی	مناسب
	مناسب	متوسط	مناسب

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.AA98.26966) تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

6. Belhadj, S. Karouach, F. Elbari, H. and Joute, Y. 2013. The biogas production from mesophilic anaerobic digestion of vinasse. *IOSR Journal of environmental science*, 5(6): 72-77.
7. Chandra, R. and Gupta, R. S. 1997. Effect of pectin on anaerobic digestion of distillery effluent and bio methane genesis in fed batch reactor. *Indian Journal of Environmental*, 17(3):199-206.
8. Chowdhry, S. D. R. Gupta, S. K. and Banerjee, S. K. 1994. Evaluation of the potentiality of tree leaves for biogas production. *Indian Forester*, 120(8): 720-728.
9. Hajiaghaalizadeh, H. Rahimi, F. and Ahmadi, E. 2012. Design of biogas field unit with polyethylene reservoir and thermal control system for biogas production in cold region, 7th national congress on agricultural machinery and mechanization, Shiraz University, Shiraz. (In Farsi)
10. Igoni, A. H. 2006. Design of anaerobic bioreactors for the simulation of biogas production from municipal solid-waste. Ph.D. Thesis of the Rivers State University of science and technology, Port Harcourt, Nigeria, 261 p.
11. Igoni, A. H. and Harry, I. S. K. 2017. Design models for anaerobic batch digesters
1. Adl, M. 2004. Basics of landfill design and energy production from burial gas, Niroo Research Center, Tehran, 299 p. (In Farsi)
2. Agunwamba, JC. 2001. Waste: Engineering and Management Tools. Enugu, Nigeria: Immaculate Publications Ltd., 572 p.
3. Aili Kejun, Y. Yaoxin, Z. and Guoyuan, F. 1991. Study and design on a high performance biogas project treating chicken manure. *Biogas Forum*, 2(1): 14-19.
4. Anon. 2006. Fermentation of organic materials, Characteristic of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. VDI4630 (Verein Deutscher Ingenieure).
5. Baier, U. and Schmidheiny, P. 1997. Enhanced anaerobic degradation of mechanically disintegrated sludge. *Water Sci Techno*, 36(11): 137-143.

22. Panigrahi, S. and Dubey, B. K. 2019. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*, 143: 779-797.
23. Reynolds, T. D. and Richards, P. A. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. Second ed. Boston: PWS Publishing Company, 798 p.
24. Saghafi, M. 1993. *Wind energy and its application in agriculture (First edition)*, University of Tehran, Tehran; 252 p. (In Farsi)
25. Suanon, F. Sun, Q. Mingyue, L. Xiang, C. Youchi, Z. Yijun, Y. and Chang-Ping, Y. 2017. Application of nanoscale zero valent iron and iron powder during sludge anaerobic digestion: Impact on methane yield and pharmaceutical and personal care products degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 231(1): 47-53.
26. Tchobanoglous, G. Burton, F. L. and Stensel, H. D. 2003. *Waste-water Engineering: treatment and reuse*. Fourth (ed). New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1819 p.
27. Vandevivere, P. De Baere, L. and Verstraete, W. 2003. Types of anaerobic digester for solid wastes, in J. Mata-Alvarez (ed.), *Bio methanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. London: IWA Press, 140 p.
28. Xie, S. Lawlor, P. G. Frost, J. P. Hu, Z. and Jhan, X. 2011. Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage. *Bioresource Technology*, 102(10): 5728- 5733.
- producing biogas from municipal solid waste. *Energy and Environmental Engineering*, 5(1): 37-53.
12. Igoni, A. H. Ayotamuno, M. J. Eze, C. L. Ogaji, S. O. T. and Probert, S. D. 2008. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*, 85(6): 430-438.
13. Kafle, G. K. Kim, S. H. and Sung, K. 2013. Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics. *Bioresource Technology*, 127(1): 326-336.
14. Kendi, G. B. G. Jamshidi, S. and Madihi, H. 2012. Presenting an optimal solution for mesoporous anesthesia design based on the results of existing research and studies. Sixth National Conference on Environmental Engineering. University of Tehran. Tehran. (In Farsi)
15. Lemmer, A. Naegele, H. J. and Sondermann, J. 2013. How efficient are agitators in biogas digesters? Determination of the efficiency of submersible motor mixers and incline agitators by measuring nutrient distribution in full-scale agricultural biogas digesters. *Energies*, 6(12): 6255-6273.
16. Li, Y. and Khanal, S. K. 2016. *Bioenergy: principles and applications*. John Wiley & Sons, 330 p.
17. Mahmoodi-Eshkaftaki, M. Ebrahimi, R. and Ghasemi-Pirbaloti, A. 2017. Design of stirred digester with optimization of energy and power consumption. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1): 104-110.
18. Mattocks, R. 1984. Understanding biogas generation, Technical Paper No. 4. Volunteers in Technical Assistance. Virginia, USA, 13 p.
19. Moraes, B. S. Junqueira, T. L. Pavanello, L. G. Cavalett, O. Mantelatto, P. E. Bonomi, A. and Zaiat, M. 2014. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane bio refineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense. *Applied Energy*, 113(1): 825-835.
20. Nizami, A. S. and Murphy, J. D. 2010. What type of digester configurations should be employed to produce bio methane from grass silage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6): 1558-1568.
21. Nizami, A. S. Saville, B. A. and Maclean, H. L. 2013. Bio energy production by anaerobic digestion_ using agricultural biomass and organic wastes-routledge: Anaerobic digesters. In Korres N. O'Kiely P. Benzie J. A. H. and West J. (Eds). Eartscan company, London and New York, 473 p.

