

اثر سرعت همزن بر ویژگی‌های ماده آبکی، جمعیت میکروبی آن و ترکیبات بیوگاز تولید شده در دستگاه بیوگاز نیمه‌صنعتی

محمود محمودی اشکفتکی^{۱*}، رحیم ابراهیمی^۲ و عبدالله قاسمی پیربلوطی^۳

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر سرعت همزن بر ترکیبات بیوگاز تولیدی در یک دستگاه بیوگاز نیمه‌صنعتی است. بدین منظور از ماده آبکی حاصل از ترکیب ۴۱٪ کود گاو، ۵۶٪ فاضلاب شهر و ۳٪ ضایعات آشپزخانه همراه با افزایش ۲/۳۸٪ سود و ۳/۷۵٪ آب اکسیژنه به عنوان پیش تیمار شیمیایی، بیوگاز تولید شد. سپس، اثر دور همزن بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دور همزن از ۶۰rpm به ۱۰۰rpm، مقدار متان و منواکسیدکربن تولیدی به ترتیب حدود ۶/۶٪ و ۷۱/۷٪ افزایش یافت و مقدار سولفید هیدروژن و اکسیژن نیز به ترتیب ۴٪ و ۵/۵٪ کاهش یافت. این امر ناشی از کاهش بیشتر اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و ذرات فرار کل ماده آبکی در دور ۱۰۰rpm نسبت به ۶۰rpm به ترتیب به مقدار ۳/۶٪ و ۳/۹٪ است که خود به خاطر افزایش جمعیت میکروب‌های بی‌هوازی به مقدار ۳/۷٪ است. علاوه بر این، روند کاملاً مشابهی بین تولید متان و جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی ماده آبکی به دست آمد که مشابه روند کاهش نیاز شیمیایی اکسیژن محلول و ذرات فرار کل بود.

واژه‌های کلیدی: ترکیبات بیوگاز، جمعیت میکروبی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، هضم بی‌هوازی، همزن.

ارجاع: محمودی اشکفتکی م. ابراهیمی ر. و قاسمی پیربلوطی ع. ۱۳۹۵. اثر سرعت همزن بر ویژگی‌های ماده آبکی، جمعیت میکروبی آن و ترکیبات بیوگاز تولید شده در دستگاه بیوگاز نیمه‌صنعتی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۱۹-۲۷: (۲۵).

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد.

* نویسنده مسئول: m.mahmoodi5@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۸

مقدمه

رسیدن به توسعه پایدار، نیازمند منابع بیشتر انرژی است. برای تأمین منابع کافی انرژی دو راه حل وجود دارد: افزایش بازدهی انرژی دستگاه‌های مورد استفاده و استفاده از منابع جدید انرژی. از طرف دیگر با افزایش جمعیت و سطح رفاه جامعه، مقدار استفاده از منابع غذایی (گیاهی و جانوری) افزایش یافته و در نتیجه برای جبران تقاضا، میزان تولید آن‌ها با رشد روبرو بوده است. همچنین با توسعه صنایع دامپروری و کشاورزی و استفاده بیشتر از منابع غذایی، آلودگی حاصل از فضولات گیاهی و دامی افزایش یافته است. در جهت تصفیه این فضولات می‌توان از روش تجزیه بی‌هوازی یا تجزیه هوازی استفاده کرد. روش بی‌هوازی در مقایسه با روش دیگر نه فقط انرژی بر نیست بلکه مقداری انرژی به شکل بیوگاز تولید می‌کند (Omran, 1996; Shaygan, 2001; Monzavi, 2002). از نکته‌های مهمی که در فرآیند اختلاط باید در نظر گرفته شود، انتخاب پروانه مناسب برای حصول توان مصرفی کمتر و زمان اختلاط کوتاه‌تر و از بین بردن یا کاهش اثر گرداب‌های ایجاد شده در اختلاط است. به طور معمول پروانه‌ها در یک طرح هندسی مشابه و طیف یکسان استفاده می‌شوند تا از مقایسه بین پژوهش‌های مختلف، نتایج مطلوبی به دست آید.

در طول سال‌ها، پژوهشگران در مورد بهینه کردن فرآیندهای اختلاط در مخازن همزن‌دار از نظر توان مصرفی، کیفیت مخلوط، زمان اختلاط و هزینه اولیه و جاری، تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. برای یک فرآیند اختلاط، مخازن با شکل‌های هندسی مختلف و پروانه‌های متفاوت به کار گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی فرآیند اختلاط، هنوز هم پژوهش در این موضوع مهم بوده و تأکید زیادی روی بررسی‌های تجربی می‌شود. اهداف مخلوط کردن مواد در هاضم، پخش کردن مواد مغذی در هاضم به طور یکنواخت (Zabaleta & Rodic, 2015)، شکل‌دهی ماده آبکی از سیال و مواد جامد موجود در هاضم (Naegle et al., 2014)، جلوگیری از ته‌نشین شدن ذرات (Naegle et al., 2014)، یکنواخت کردن دمای ماده آبکی (Hennig et al., 2011; Hosseini & Abdul Wahid, 2014)، جلوگیری از شکل‌گیری کف و کمک به استخراج بیوگاز از مواد (Hosseini & Abdul Wahid, 2014) است.

به طور معمول پروانه‌ها در یک طرح هندسی مشابه و طیف یکسان استفاده می‌شوند تا از مقایسه بین پژوهش‌های مختلف، نتایج مطلوبی به دست آید (Kamarad et al., 2013). پژوهشی نشان داده است با بالا بردن سرعت همزن زمان اختلاط کاهش می‌یابد (Melton et al., 2002)، اما این نکته همچنان مورد بررسی است که با بالا بردن سرعت همزن ترکیبات موجود در بیوگاز تولیدی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده آبکی چه تغییراتی می‌کند.

فرآیند تخمیر بی‌هوازی بیشتر برای ضایعات حاصل از کود گاوی استفاده می‌شود (Gunaseelan, 1997; Chynoweth et al., 2001; Salminen & Rintala, 2002; Lopes et al., 2004). در بسیاری از هاضم‌ها نیز از ضایعات میوه و سبزیجات به طور هضم همزمان با کود گاوی در تولید بیوگاز استفاده شده است (Martin, 2008; Chen et al., 2010; Budiyono et al., 2010). به هر جهت پژوهش‌های محدودی در مورد هضم همزمان کود گاوی، ضایعات میوه و سبزیجات و فاضلاب شهری انجام شده است، در حالیکه این مواد رایج‌ترین ضایعات موجود هستند و درصد ترکیب این مواد روی مقدار تولید گاز متان مؤثر است (Arsova, 2010; Rongping et al., 2010). بنابراین اهداف انجام این پژوهش عبارتند از: بررسی اثر دور همزن بر ترکیبات موجود در بیوگاز تولید شده شامل متان، منواکسیدکربن، سولفید هیدروژن و اکسیژن؛ بررسی تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده آبکی با هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز؛ تعیین ارتباط بین تغییرات ذرات فرار و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی با متان تولید شده و فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی در ماده آبکی.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی پیش ماده‌ها

برای تولید بیوگاز در این پژوهش از هضم همزمان کود گاوی، پسماند آشپزخانه و فاضلاب شهری استفاده شد. برای آماده‌سازی اولیه آن‌ها تلاش شد تا حد امکان چگالی اولیه مواد یکسان باشند. هدف از این کار ایجاد مواد اولیه تا حد امکان مشابه بود. البته آماده‌سازی مواد می‌تواند بر اساس ذرات جامد کل (TS¹) نیز انجام شود اما با توجه به اینکه یکی از اهداف پژوهش بررسی اثر TS و ذرات فرار

1- Total Solid (TS)

دستگاه کج‌دال مدل v50، فسفر (P) با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر مدل Breeze, USA، پتاسیم (K) با استفاده از دستگاه فلیم فوتومتر مدل PFP7، سولفات (SO_4^{2-}) به روش وزن‌سنجی، EC و pH با استفاده از دستگاه‌های pH متر و EC متر مدل متروم سوئیس و نیاز شیمیایی اکسیژن محلول (COD) با استفاده از COD متر مدل ۱۹۲۵ کمپانی Lamotte اندازه‌گیری شد.

تهیه ماده آبکی در دستگاه بیوگاز و بررسی اثر دور همزن

کود گاوی، فاضلاب شهری و ضایعات آشپزخانه با ترکیب ۴۱٪، ۵۶٪ و ۳٪ در هاضم نیمه صنعتی (شکل ۱) با هم مخلوط شدند و به مخلوط ایجاد شده در ابتدای هضم مقدار NaOH و H_2O_2 به ترتیب برابر با ۲/۳۸٪ و ۳/۷۵٪ اضافه شد. انتخاب این نسبت ترکیب مواد بر اساس پژوهش (Mahmoodi-Eshkaftaki & Ebrahimi, 2016) انجام شد که با استفاده از طرح مرکب- مخلوط و با آزمایش‌های مختلف با نسبت ترکیب مختلف مواد و با روش سطح پاسخ انتخاب شدند. سپس قبل از شروع هضم مواد مذکور به وسیله همزن با دور ۳۰۰ rpm به مدت ۵ دقیقه هم زده شدند تا ماده آبکی یکنواختی از مخلوط مواد ایجاد شود. بر اساس پژوهش‌های Mahmoodi-Eshkaftaki & Ebrahimi (2016) با این نسبت ترکیب مواد و این مقدار NaOH و H_2O_2 ، بیشترین مقدار متان در هاضم‌های آزمایشگاهی تولید می‌شود.

مخلوط ایجاد شده در شرایط به طور کامل بی‌هوازی در دستگاه نیمه‌صنعتی بیوگاز موجود در شکل ۱ و در شرایط دمایی مزوفیلیک (37°C) قرار گرفت و ترکیبات موجود در بیوگاز تولید شده حاصل از سرعت‌های همزن ۶۰ rpm و ۱۰۰ rpm شد. انتخاب سرعت همزن بر اساس پژوهش (Mahmoodi-Eshkaftaki et al., 2016) انجام شد. به طور کلی همزدن مواد روزانه و به فاصله زمانی ۱۰ ساعت (در ساعت‌های ۹ و ۱۷) انجام شد. ترکیبات بیوگاز اندازه‌گیری شده شامل متان، منواکسیدکربن، سولفید هیدروژن و اکسیژن بود. این ترکیبات در بازه‌های زمانی ۵ روزه به مدت ۴۰ روز با یک دستگاه گازسنج چندمنظوره GT43 برند GMI Ltd ساخت آمریکا اندازه‌گیری شدند. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری با دقت ۱ ppm را دارد در ضمن می‌تواند متان و اکسیژن را به صورت درصد حجمی و در

کل (TVS^۱) مواد است، آماده‌سازی اولیه مواد بر اساس چگالی انجام شد.

فاضلاب شهری از سازمان آب و فاضلاب شهرکرد و از فاضلاب بعد از عملیات آسیاب و آب شویی اولیه تهیه شد. چگالی کلی آن با تقسیم وزن مقدار مشخصی از مخلوط بر حجم نمونه محاسبه شد. برای این منظور، ۲ لیتر از فاضلاب تهیه شده وزن شد و چگالی آن برابر با g ml^{-1} ۱/۰۲۴^۱ به دست آمد. همان‌طور که مشخص است چگالی آن بسیار نزدیک به ۱ (چگالی آب) است و این نشان می‌دهد که ماده استفاده شده دارای مقدار زیادی آب است (Fantozzi & Buratti, 2009; Chandra et al., 2012).

برای تهیه نمونه‌های کود گاوی، مقداری کود تازه گاو از گاوداری دانشگاه شهرکرد تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه به آن آب اضافه شد و با استفاده از همزن مکانیکی، مخلوط شده و چگالی آن اندازه‌گیری شد. این عمل چندین مرتبه تکرار شد تا چگالی آن برابر g ml^{-1} ۱/۰۲۴ شود.

پسماند آشپزخانه شامل مخلوط میوه و سبزیجات (پوست سیب درختی، انار، سیب زمینی و سبزیجات دورریز) با استفاده از دستگاه سبزی خردکنی تا حد امکان خرد شد و سپس با استفاده از آسیاب به صورت دستی آسیاب شد و با اضافه کردن مکرر آب و اندازه‌گیری چگالی، تلاش شد چگالی آن برابر g ml^{-1} ۱/۰۲۴ شود.

پیش ماده‌ها پس از تهیه شدن از الک ۲mm عبور داده و مواد جامد بزرگ موجود در مواد جمع‌آوری شدند.

ویژگی‌های پیش‌ماده‌ها

برای تعیین اثر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده آبکی بر تولید بیوگاز از هاضم‌های کوچک ۲۵۰ میلی‌لیتری و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی استفاده شد. بدین منظور چهار مخلوط از ترکیب کود گاوی، فاضلاب شهری و ضایعات آشپزخانه به صورت ۴۱٪ : ۵۶٪ : ۳٪، ۱۰۰٪ : ۰٪ : ۰٪، ۰٪ : ۱۰۰٪ : ۰٪ و ۰٪ : ۰٪ : ۱۰۰٪ در سه تکرار انتخاب شد. TS و TVS قبل و بعد از هضم بر اساس روش‌های استاندارد موجود در Method 1684 و CEN/TS 15148 اندازه‌گیری شدند. کربن (C) به روش تیتراسیون (Rongping et al., 2010)، نیتروژن (N) با استفاده از

1- Total Volatile Solid (TVS)

توان مصرفی و گشتاور تولیدی انجام شده است بر اساس پژوهش‌های (Mahmoodi-Eshkaftaki et al. (2016 انجام شد.

شرایط دمایی ۲۰- تا ۵۰ °C اندازه‌گیری کند. انتخاب ابعاد هاضم، ماده آبکی، دمای هضم و کلیه پارامترهای مربوط به هاضم و همچنین انتخاب همزن که بر اساس



شکل ۱- دستگاه تولید بیوگاز و همزن ملخی استفاده شده با قابلیت کنترل دما، pH، دور همزن و فشار گاز تولیدی

کلونی‌های ایجاد شده شمارش و جمعیت میکروپها گزارش شد.

نتایج و بحث

مقدار میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده از ماده آبکی در سه تکرار حاصل از ترکیب پیش ماده‌ها با نسبت مذکور و همچنین پیش ماده‌ها به طور جداگانه در هاضم‌های کوچک ۲۵۰ میلی‌لیتری در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که pH مواد قبل از هضم در حد خنثی بوده است و فقط در پسماند آشپزخانه کمی حالت بازی دارد که البته پس از ترکیب مواد ماده آبکی حاصل در کل خنثی شد. همچنین مشاهده می‌شود، پس از انجام واکنش‌ها، pH کمی کاهش یافته است اما همچنان در حالت خنثی قرار دارد. این در حالی است که در نتایج دیگر پژوهشگران بیان شده با انجام واکنش‌ها در زمان طولانی، pH کاهش می‌یابد (Fantozzi & Buratti, 2009, 2011) که در این پژوهش با افزایش NaOH و H₂O₂ به خوبی کنترل شده است. از دیگر عناصر بسیار مؤثر در تولید گاز متان در واکنش بی‌هوازی C و N هستند که C تعیین کننده مقدار گاز متان و N عامل سوخت و ساز و واکنش در محیط است. نسبت C/N پارامتر بسیار مؤثری در تولید متان است. همان‌طور که در

ویژگی‌های مذکور به طور مستقیم و غیرمستقیم بر فعالیت باکتری‌های موجود در ماده آبکی اثرگذار هستند. بنابراین، در این پژوهش به اندازه‌گیری فعالیت باکتری‌های ماده آبکی تهیه شده در دستگاه بیوگاز نیمه‌صنعتی پرداخته شد. برای شمارش جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی، از ماده آبکی موجود در هاضم‌ها نمونه‌برداری شد. از آگار با پایه بی‌هوازی^۱ که با ۱۰٪ خون اسب استریل شده است به عنوان محیط کشت استفاده شد. در ادامه روش پور پلیت^۲ برای کشت میکروپها استفاده شد (Fu et al., 2006; Dohrmann et al., 2011; Yu et al., 2014) بدین منظور نمونه‌های انتخاب شده از ماده آبکی ابتدا به دقت در آب مقطر استریل رقیق‌سازی شدند تا شمارش آن قابل انجام باشد. سپس نمونه‌های رقیق شده با استفاده از پیپت به محیط‌های کشت اضافه شده، پتری دیش‌های دارای مواد در جار بی‌هوازی قرار داده شدند و در کنار آن‌ها گاز پک^۳ نوع A قرار داده شد تا اکسیژن محیط را مصرف کرده و محیطی به طور کامل بی‌هوازی در اطراف محیط کشت ایجاد کند. جار مذکور به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور در دمای ۳۷°C قرار داده شد و در پایان تعداد

1- Anaerobe basal agar

2- Pour-Plate

3- Gas pack

در محدوده مناسبی برای تولید متان قرار دارد (Boonsawang et al., 2014). در ضمن مقادیر TS و TVS نیز در محدوده بسیار خوبی برای افزایش تولید متان قرار دارد (Chynoweth et al., 2001; Salminen & Rintala, 2002).

در مجموع نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد قبل از هضم نشان می‌دهد که مواد از نظر تولید بیوگاز/متان در وضعیت بسیار مناسبی هستند و حتی ترکیب مواد با نسبت مذکور سبب بهبود آن می‌شود. حال این موضوع مطرح می‌شود که سرعت‌های مختلف همزن چه اثری بر تولید بیوگاز و ترکیبات آن دارد. بدین منظور با حفظ نسبت مذکور در ترکیب پیش‌ماده‌ها، آن‌ها در هاضم نیمه صنعتی ریخته شدند و روند تغییرات ترکیبات موجود در بیوگاز بر حسب زمان به مدت ۴۰ روز برای دو سرعت دورانی ۶۰rpm و ۱۰۰rpm که در شکل ۲ نشان داده شده است را ارزیابی شدند. همان‌طور که دیده می‌شود به طور کلی مقادیر متان تولید شده در روزهای اندازه‌گیری در دور ۱۰۰rpm بیشتر یا مساوی مقادیر متناظر در ۶۰rpm است (شکل ۲a). به طوری که اثر دور همزن روی تولید متان در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. این در حالی است که منواکسید کربن نیز در بیوگاز تولید شده در ۱۰۰rpm بیشتر از ۶۰rpm است (شکل ۲c). اما مقدار سولفید هیدروژن و اکسیژن در ۱۰۰rpm کمتر از ۶۰rpm بود (شکل‌های ۲b,d). اثر دور همزن روی مقدار سولفید هیدروژن در سطح ۵٪ و روی مقدار اکسیژن در سطح ۱٪ معنی‌دار است.

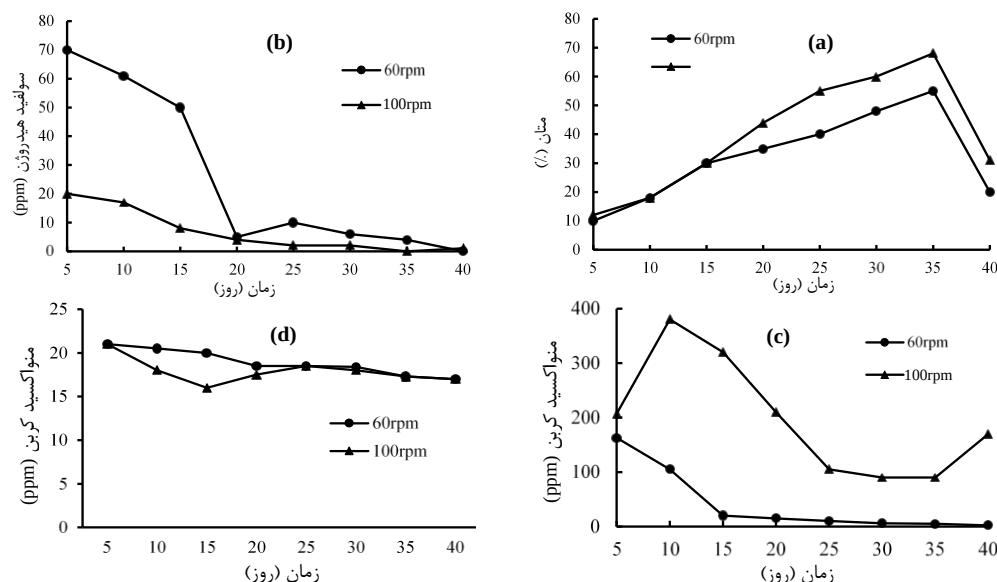
جدول ۱ آمده است در ابتدای واکنش‌ها نسبت C/N ماده آبکی حاصل از ترکیب مواد ۲۱/۲۷ است و در محدوده مناسب است. بر اساس نتایج پژوهش‌های دیگر، نسبت C/N بین ۲۰ تا ۳۰ برای انجام واکنش‌های بی‌هوازی و تولید گاز متان بسیار مناسب است (Chen et al., 2010; Chandra et al., 2012). این نسبت افزایش قدرت ماده آبکی را در تولید متان نسبت به هر کدام از مواد به طور جداگانه به خوبی نشان می‌دهد. در فاضلاب شهری این نسبت ۱۵/۶ است و پایین‌تر از محدوده مناسب است اما همان‌طور که در جدول هم مشخص است پایین بودن نسبت C/N به خاطر مقدار زیاد N است، به طوری که مقدار C در فاضلاب شهری خیلی بیشتر از کود گاوی است. این موارد نشان می‌دهد که با شروع واکنش‌ها به خاطر N بیشتر موجود در فاضلاب شهری مقدار متان تولیدی آن در ابتدای واکنش‌ها می‌تواند بیشتر از کود گاوی باشد. اما با توجه به محدوده مناسب C/N در کود گاوی، این ماده هم می‌تواند به خوبی متان تولید کند. نسبت C/N ضایعات آشپزخانه بسیار پایین است و بیانگر قدرت کم ضایعات آشپزخانه در تولید بیوگاز به تنهایی است. مشکل پایین بودن نسبت C/N با ترکیب مواد بر طرف شد و مقدار نشان داده شده در جدول به خوبی مشخص می‌کند که با این نسبت ترکیب مواد می‌توان بیوگاز با درصد بالای متان تولید کرد.

در ماده آبکی حاصل از ترکیب مواد قبل از هضم مقدار K بسیار کم است و در نتیجه اثر منفی بر تولید متان ندارد (Fang et al., 2011). همچنین مقدار pH، N و P آن نیز

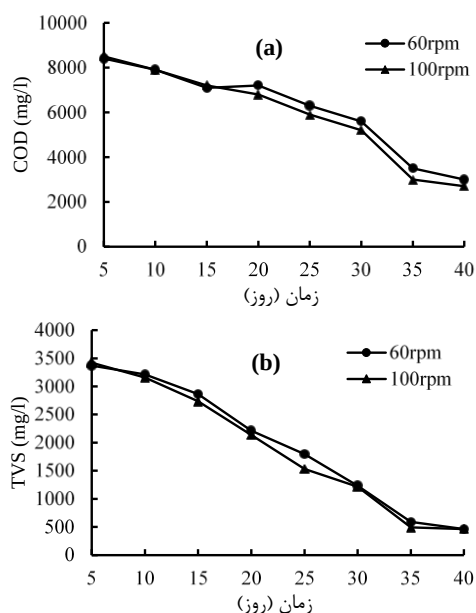
جدول ۱- مقدار ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده‌های آبکی استفاده شده در تولید بیوگاز

ویژگی‌های	قبل از هضم			بعد از هضم	
	A	B	C	0.41A:0.56B:0.03C	0.41A:0.56B:0.03C
pH	۷/۵۰	۷/۶۲	۸/۲۰	۷/۶۰	۷/۵۹
EC (ds/M)	۱/۷۶	۲/۵۰	۲/۴۰	۱/۷۶	۲/۱۹
کربن (/.)	۱۵/۹۰	۳۵/۹۰	۱۵/۴۰	۱۷/۵۱	۲۷/۰۸
نیتروژن (/.)	۰/۵۳	۲/۳۰	۱/۹۸	۰/۶۹	۱/۵۶
نیتروژن/کربن	۳۰/۱۰	۱۵/۶۰	۷/۷۸	۲۴/۵۵	۲۱/۲۷
پتاسیم (ppm)	۱۳۵/۰	۱۶۷/۵	۱۴۰/۰	۱۵۷/۶۰	۱۵۳/۳۵
فسفر (ppm)	۲۰/۷۰	۲۸/۰۶	۱۱/۸۲	۹/۵۸	۲۴/۵۵
سولفات (ppm)	۲/۴۲	۳/۱۴	۲/۳۹	۱/۲۲	۲/۸۲
ذرات فرار کل (mg/l)	۳۵۹۲/۸۶	۳۳۴۶/۴۳	۸۵۷/۱۴	۴۶۲/۳۸	۳۳۷۲/۷۸
ذرات جامد کل (mg/l)	۴۸۳۹/۲۹	۷۱۵۳/۵۷	۳۵۵۳/۵۷	۲۹۷۹/۲۳	۶۰۹۶/۷۱

A، B و C به ترتیب کود گاوی، فاضلاب شهری و ضایعات آشپزخانه هستند.



شکل ۲- روند تغییرات ترکیبات موجود در بیوگاز تولید شده از دستگاه بیوگاز در ۴۰ روز



شکل ۳- روند تغییرات COD و TVS نمونه‌های انتخاب شده از ماده آبی در مدت ۴۰ روز

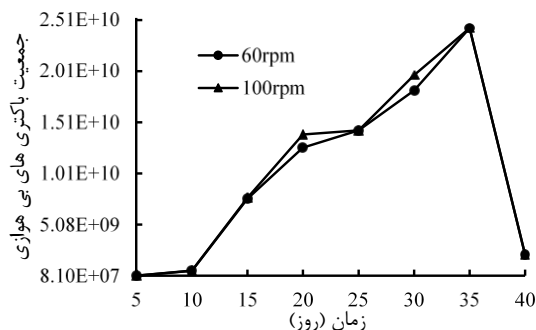
تحقیق‌های پژوهشگران نشان داده است که بهبود شرایط هاضم، ترکیب مواد، بهبود همزن و سایر ویژگی‌های مربوط به تولید بیوگاز، رابطه مستقیمی با فعالیت میکروب‌های داخل هاضم در هنگام هضم مواد دارد به طوری که در شرایط مناسب هر قدر فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی مانند باکتری‌های متانوزئیک در هاضم بیشتر باشد، سبب تولید متان بیشتری در بیوگاز می‌شود (Dearman et al., 2006; Lee et al., 2009; Martin-Gonzalez et al., 2011; Zhang et al., 2011; Chen et al., 2016). پس، در این پژوهش روند تغییرات جمعیت

با میانگین‌گیری از مقدار ترکیبات تولید شده در ۴۰ روز مشخص شد که افزایش دور همزن از ۶۰rpm به ۱۰۰rpm سبب افزایش ۶/۶٪ گاز متان و ۷۱/۷٪ گاز منوآکسیدکربن شد و سبب کاهش ۴٪ سولفید هیدروژن و ۵/۵٪ گاز اکسیژن در ترکیبات بیوگاز تولیدی شد.

نتایج نشان داده شده در شکل ۲ بیان می‌کند که در روزهای ۳۰-۳۵ بیشترین مقدار متان تولید می‌شود. این امر ناشی از واکنش‌های رخ داده داخل ماده آبی و فعالیت میکروب‌های داخل آن است. بدین منظور، در ادامه روند تغییرات COD و TVS ماده آبی با زمان بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان هضم، مقدار COD و TVS کاهش می‌یابد (شکل ۳a,b). به طوری که با گذشت زمان و تولید متان/بیوگاز، COD و TVS که ارتباط مستقیمی با تولید بیوگاز دارند کاهش می‌یابد. مقدار کاهش COD و TVS در روزهای ۳۰-۳۵ بیشترین مقدار است. این امر نشان می‌دهد واکنش‌های انجام شده در این روزها نسبت به سایر روزها بیشتر بوده و سبب تولید بیشتر متان/بیوگاز شده است. این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران مشابه است (Ahmad & Ghufuran, 2014).

با مقایسه روند تغییرات متان و باکتری‌های بی‌هوازی در روزهای هضم مشخص شد که هر دو ویژگی در روزهای بین ۳۰ تا ۳۵ روز به بیشینه مقدار خود رسیدند و شروع به کاهش فعالیت کردند. به طور کلی ضریب همبستگی بین مقادیر تولید متان و جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی یک بود که در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). این موضوع اثر زیادی باکتری‌های بی‌هوازی را در افزایش تولید متان به خوبی نشان می‌دهد. به طوری که با افزایش جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی واکنش‌های داخل هاضم هم بیشتر می‌شود و در نتیجه TVS با سرعت بیشتری تجزیه شده و COD به شدت کاهش می‌یابد و به بیوگاز تبدیل می‌شوند. همبستگی بین پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. با افزایش بیوگاز مقدار متان نیز که رابطه مستقیمی با بیوگاز تولیدی دارد افزایش می‌یابد.

باکتری‌های بی‌هوازی در روزهای هضم بررسی شد (شکل ۴) و نتایج نشان داد که جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی در دور ۱۰۰rpm حدود ۳/۶٪ بیشتر از جمعیت باکتری‌ها در دور ۶۰rpm بود. به طور کلی تغییر سرعت در سطح ۵٪ بر جمعیت باکتری‌ها اثرگذار بوده است. این موضوع توجیه بسیار مناسبی از افزایش تولید متان در دور ۱۰۰rpm است.



شکل ۴- جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی نمونه‌های انتخاب شده از ماده آبی در مدت ۴۰ روز

جدول ۲- همبستگی بین متان، جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی، COD و TVS به روش Spearman

TVS	COD	جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی	متان	پارامترها
-۰/۶۵*	-۰/۶۵*	۱**	۱	متان
-۰/۶۵*	-۰/۶۵*	۱	۱**	جمعیت باکتری‌های بی‌هوازی
۱**	۱	-۰/۶۵*	-۰/۶۵*	COD
۱	۱**	-۰/۶۵*	-۰/۶۵*	TVS

* در سطح ۵٪، ** در سطح ۱٪

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج به خوبی مشخص کرد که با افزایش سرعت همزن مقدار متان و منواکسیدکربن تولیدی در بیوگاز افزایش می‌یابد در حالیکه اکسیژن و سولفید هیدروژن موجود در بیوگاز کاهش می‌یابد. در ضمن نتایج نشان داد که افزایش تولید متان/ بیوگاز ناشی از افزایش واکنش‌های رخ داده در ماده آبی است که سبب کاهش شدیدتر COD و TVS در روزهای تولید بیشتر متان است. افزایش شدیدتر واکنش‌ها ناشی از افزایش فعالیت میکروبی در هاضم است. به طوری که باکتری‌های بی‌هوازی در روزهای تولید بیشتر متان، بیشترین جمعیت را داشته‌اند. بنابراین با افزایش سرعت همزن از ۶۰rpm به ۱۰۰rpm می‌توان تا حدودی تولید گاز متان را افزایش داد و سبب بالا رفتن راندمان دستگاه بیوگاز شد.

منابع

- Ahmad, A. and Ghufuran, R. 2014 Evaluation of the bio-kinetics of cement kiln dust in an up flow anaerobic sludge blanket reactor for treatment of palm oil mill effluent as a function of hydraulic retention time. Separation and Purification Technology, 133: 129-137.
- Arsova L. 2010 Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for M.S. Degree to the Graduate in Earth Resources Engineering Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation of Engineering and Applied Science Columbia University, 156 p.
- Boonsawang, P. Rerngnarong, A. Tongurai, C. and Chaiprapat, S. 2014 Effect of nitrogen and phosphorus on the performance

13. Fantozzi F. and Buratti C. 2011 Anaerobic digestion of mechanically treated OFMSW: Experimental data on biogas/methane production and residues characterization. *Bioresource Technology*, 102: 8885–8892.
14. Fu C.J. Carter J.N. Li Y. Porter J.H. and Kerley M.S. 2006 Comparison of agar plate and real-time PCR on enumeration of *Lactobacillus*, *Clostridium perfringens* and total anaerobic bacteria in dog faeces. *Journal compilation 2006 The Society for Applied Microbiology, Letters in Applied Microbiology*, 42: 490–494.
15. Gunasellan V.N. 1997 Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass & Bioenergy*, 13: 83–114.
16. Hennig T. Dudlik A. and Deerberg G. 2011 Simulation of fluid flow in biogas fermenters. *Chemie Ingenieur Technik*, 83 (3): 331–339.
17. Hosseini S.E. and Abdul Wahid M. 2014 Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 868–875.
18. Kamarad L. Pohn S. Bochmann G. and Harasek M. 2013 Determination of mixing quality in biogas plant digesters using tracer tests and computational fluid dynamics. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 140(5): 1–12.
19. Lee M. Hidaka T. Hagiwara W. and Tsuno H. 2009 Comparative performance and microbial diversity of hyperthermophilic and thermophilic co-digestion of kitchen garbage and excess sludge. *Bioresource Technology*, 100: 578–583.
20. Lopes W.S. Leite V.D. and Prasad S. 2004 Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 94: 261–266.
21. Mahmoodi-Eshkaftaki M. and Ebrahimi R. 2016 Design and construction a batch biogas plant and study on the effects of mixer type, mixer speed, and digestion conditions for methane enrichment. Ph.D. thesis of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, 172p.
22. Mahmoodi-Eshkaftaki M. Ebrahimi R. and Ghasemi-Pirbaloti A. 2016 Design of stirred digester with optimization of energy and power consumption. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, DOI 10.1002/ep.
23. Martin J.H. 2008 A new method to evaluate H₂S removal from biogas. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for M.S. Degree to the Graduate in Faculty of acidogenic and methanogenic reactors for treatment of biodiesel wastewater. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 36(6): 643–649.
4. Budiyo, I. N. Widiya, S. and Sunarso, J. 2010 The Kinetic of biogas production rate from cattle manure in batch mode. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 3(1): 110–118.
5. Chandra, R. Takeuchi, H. Hasegawa, T. and Kumar, R. 2012 Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. *Energy*, 43: 273–282.
6. Chen, R. Roos, M. M. Zhong, Y. Marsh, T. Roman, M. B. Ascencio, W. H. Uribe L. Lorio, L. U. Kirk, D. Reinhold, D. M. Chavarria, J. A. M. Ruiz, D. B. Pereira, J. F. A. Montero, W. R. Srivastava, A. and Liao W. 2016 Responses of anaerobic microorganisms to different culture conditions and corresponding effects on biogas production and solid digestate quality. *Biomass and Bioenergy*, 85: 84–93.
7. Chen, X. Romano, R. T. and Zhang, R. 2010 Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *International Journal of Agriculture and Biology Engineering*, 3(4): 61–72.
8. Chynoweth D. P. Owens J. M. and Legrand R. 2001 Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, 22: 1–8.
9. Dearman B. Marschner P. and Bentham R.H. 2006 Methane production and microbial community structure in single-stage batch and sequential batch systems anaerobically co-digesting food waste and biosolids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 69: 589–595.
10. Dohrmann A.B. Baumert S. Klingebiel L. Weiland P. and Tebbe C.C. 2011 Bacterial community structure in experimental methanogenic bioreactors and search for pathogenic clostridia as community members. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89: 1991–2004.
11. Fang C. Boe K. and Angelidaki I. 2011 Anaerobic co-digestion of desugared molasses with cow manure, Focusing on sodium and potassium inhibition. *Bioresource Technology*, 102(2): 1005–1011.
12. Fantozzi F. and Buratti C. 2009 Biogas production from different substrates in an experimental continuously stirred tank reactor anaerobic digester. *Bioresource Technology*, 100: 5783–5789.

- North Carolina State University. Biological and Agriculture Engineering Raleigh, North Carolina, 124p.
24. Martin-Gonzalez L. Castro R. Pereira M.A. Alves M.M. Font X. and Vicent T. 2011 Thermophilic co-digestion of organic fraction of municipal solid wastes with FOG wastes from a sewage treatment plant: Reactor performance and microbial community monitoring. *Bioresource Technology*, 102: 4734-4744.
25. Melton L.A. Lipp C.W. Spradling R. W. and Paulson K.A. 2002 DISMT – Determination of Mixing Time through Color Changes. *Chemical Engineering Communications*, 189(3): 1-8.
26. Monzavi M. 2002 Urban wastewater treatment. 10th Edition, Tehran University Press, 150p.
27. Naegele H.J. Mönch-Tegeder M. Leonard Haag N. and Oechsner H. 2014 Effect of substrate pretreatment on particle size distribution in a full-scale research biogas plant. *Bioresource Technology*, 172: 396-402.
28. Omrani G.A. 1996 The development of biogas in Iran and world. *Biogas Seminar*, 1-15.
29. Rongping L. Shulin C. and Xiujiu L. 2010 Biogas Production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160: 643-654.
30. Salminen E. and Rintala J. 2002 Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste: A review. *Bioresource Technology*, 83: 13-26.
31. Shaygan J. 2001 Conversion of organics in wastewater to Methane using anaerobic digestion. *Biogas Seminar*, 32-46.
32. Yu D. Kurola J.M. Lähde K. Kymäläinen M. Sinkkonen A. and Romantschuk M. 2014 Biogas production and methanogenic archaeal community in mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion processes. *Journal of Environmental Management*, 143: 54-60.
33. Zabaleta I. and Rodic L. 2015 Recovery of essential nutrients from municipal solid waste– Impact of waste management infrastructure and governance aspects. *Waste Management*, 44: 178-187.
34. Zhang Y. Zamudio Canas E.M. Zhu Z.W. Linville J.L. Chen S. and He Q. 2011 Robustness of archaeal populations in anaerobic co-digestion of dairy and poultry wastes. *Bioresource Technology*, 102: 77.

