

بررسی آزمایشگاهی تأثیر روش تخلیه و فشار زیست‌گاز تولیدی بر فرایند هضم بی‌هوازی

لیلا یوسفی*⁺

گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلام شهر، ایران

امید نظام‌آبادی

گروه انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده: فرایند هضم بی‌هوازی با تولید زیست‌گاز همراه است بنابراین فشار پارامتر مهم مؤثر بر فرایند خواهد بود. چگونگی تخلیه زیست‌گاز تولیدی روی نوع سامانه و نیز فشار عملیاتی تأثیرگذار است که هر دو بر فرایند هضم بی‌هوازی کیفیت و کمیت زیست‌گاز تولیدی اثر دارند. در این پژوهش تأثیر چگونگی تخلیه زیست‌گاز در مجموعه دستگاهی هضم بی‌هوازی مقیاس آزمایشگاهی روی فرایند تولید زیست‌گاز با رویکرد صنعتی به سه روش مورد بررسی قرار گرفت. در هر سه روش پس از تزریق خوراک درون هاضم سامانه تحت خلاء نسبی حدود $0/1 \text{ bar}_g$ - به ازاء واحد جرم خوراک قرار گرفت. روش اول سامانه بسته روش دوم و سوم نسبت به خروج زیست‌گاز به ترتیب نیمه پیوسته و پیوسته لحاظ شد. سایر شرایط عملیاتی مانند دمای اختلاط، نوع و میزان خوراک برای هر سه روش یکسان بود. برای خوراک و فراورده هضم شده ترکیب نسبی رطوبت بخش خشک بخش آلی و خاکستر اندازه‌گیری و آنالیز عنصری انجام شد. آنالیز زیست‌گاز تولیدی نیز برای اندازه‌گیری ترکیب نسبی متوسط زیست‌گاز انجام شد. نتیجه‌های به دست آمده از آنالیز فراورده‌ها و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که حجم بیوگاز تولیدی روش سوم نسبت به روش‌های دوم و اول به ترتیب $9/64\%$ و $15/53\%$ افزایش داشته است. این ارقام در مورد افزایش سهم حجم متان از کل زیست‌گاز تولیدی به ترتیب $2120/22\%$ و $21/31\%$ اندازه‌گیری شد. مرحله‌های چهارگانه هضم بی‌هوازی در روش پیوسته در تعادل با یک‌دیگر به‌طور یکنواخت انجام می‌شود. خروج تدریجی زیست‌گاز تولیدی و فشار پایین سامانه شرایط فرایند را برای فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها بویژه متانزها یکنواخت و مستعد می‌نماید. بنابراین روش تخلیه تدریجی و فشار پایین زیست‌گاز تولیدی ناشی از عدم انباشتگی آن درون مخزن هضم سامانه پیوسته در خلال فرایند هضم بی‌هوازی بهترین نتیجه را از نظر حجم زیست‌گاز و متان تولیدی دارد.

واژه‌های کلیدی: هضم بی‌هوازی، روش تخلیه، زیست‌گاز، متان، فشار.

KEYWORDS: anaerobic digestion, discharge method, biogas, methane, pressure.

مقدمه

در زمین یا رها سازی آن در محیط سبب آلودگی خاک، آب و هوا می‌شود که حیات انسان و سایر موجودات زنده را به مخاطره می‌افکند [۳، ۴].

رشد روز افزون جمعیت در سطح دنیا موجب افزایش تولید پسماندهای آلی شده است [۱، ۲]. دفع این پسماندها به شیوه دفن

*E-mail: l_usefi@iiu.ac.ir

*عهدہ دار مکاتبات

را کند می‌نماید. در نتیجه انباشتگی میکرو ارگانسیم‌های متان زا و نیز ترکیب‌های به‌دست‌آمده از روش هیدرولیز را کاهش می‌دهد و سرانجام سبب کندی فرایند هضم بی‌هوازی می‌شود. بر اساس مطالعه‌های آزمایشگاهی بیش‌ترین راندمان فرایند زیست‌شیمیایی هضم بی‌هوازی در کم‌ترین فشار به‌دست‌می‌آید [۱۴، ۱۳]. افزایش فشار درون هاضم از متابولیسم باکتری‌های بی‌هوازی جلوگیری می‌نماید [۱۵]، لیکن کاهش فشار جزئی هیدروژن سبب افزایش نرخ تولید هیدروژن در روش اسیدزایی فرایند هضم بی‌هوازی می‌شود [۱۷، ۱۶]. در پژوهشی دیگر فرایند هضم بی‌هوازی درون سه راکتور ناپیوسته مقیاس آزمایشگاهی در فشارهای عملیاتی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بار ناشی از گاز نیتروژن طی مدت ۳۵ روز تفاوت چشمگیری را در نتیجه‌ها نشان نداد. میزان تجزیه مواد آلی و راندمان متان در سه فشار یاد شده افزایش یا اختلاف چشمگیری نسبت به یک‌دیگر ندارند. تنها با افزایش فشار حلالیت گاز CO₂ افزایش یافته و در نتیجه زیست‌گاز به‌دست‌آمده نسبت به متان غنی‌تر است. همچنین با افزایش فشار میزان کاهش pH در بازه ۷ تا ۶/۲۵ بیش‌تر خواهد بود [۱۸]. نتیجه‌های آزمایشگاهی دیگر نشان می‌دهد که افزایش فشار جزئی گاز CO₂ در هاضم سبب افزایش pH و منجر به تولید گاز سمی و بازدارنده هیدروژن سولفید می‌شود، ولیکن در زمینه موارد دیگر نتیجه‌های همانند پژوهش‌های اشاره شده است [۲۲، ۱۹]. هر چه فشار درونی فرایند برای شروع کار کم‌تر و خلاء قوی‌تر باشد، حجم زیست‌گاز و ترکیب نسبی متان افزایش یافته و نیاز به محلول‌های قلیایی برای کنترل pH کاهش می‌یابد [۲۳]. در بخشی از پژوهشی دیگر که فرایند تخمیر زیستی در بطری‌های ۱۰۰-۱۲۰ میلی لیتر با خوراک مخلوط ذرت انباری و تفاله جو در شرایط انکوباتور در دمای ۳۷ °C انجام شده است، تأثیر کاهش فشار زیست‌گاز تولیدی از طریق تخلیه با سرنگ به‌طوری‌که فشار زیست‌گاز درون بطری روزانه در تعادل با فشار اتمسفر باشد، بررسی شده است. در این پژوهش مشخص شده حجم و نیز ترکیب نسبی متان زیست‌گاز در بطری‌هایی که زیست‌گاز تولیدی به‌طور روزانه تخلیه می‌شود و فشار درونی آن‌ها متعادل با فشار اتمسفری است نسبت به نمونه‌های همانند بدون تخلیه زیست‌گاز بیش‌تر است [۲۴].

در این پژوهش هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر چگونگی تخلیه، خروج زیست‌گاز تولیدی و فشار ناشی از انباشتگی آن درون هاضم بر روی فرایند هضم بی‌هوازی با رویکرد صنعتی است.

بخش تجربی

تجهیزها

شکل ۱ مجموعه دستگاهی کاربردی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

یکی از بهترین روش‌های مدیریت و دفع این دسته از پسماندها استفاده از فرایند هضم بی‌هوازی است. هضم بی‌هوازی شامل مجموعه مراحل زیست‌شیمیایی متوالی است که مواد تجزیه‌پذیر آلی در غیاب اکسیژن به متان و دی اکسید کربن تبدیل می‌شود [۵]. در این روش نه تنها معضلات ناشی از امحاء و دفع پسماند که به آن‌ها اشاره شد، مرتفع می‌شود بلکه موجب تولید فرآورده‌ها جانبی شامل زیست‌گاز و کودآلی جامد یا مایع نیز خواهد شد. این فرآورده‌ها سبب توجیه‌پذیری اقتصادی روش هضم بی‌هوازی می‌شود [۶]. افزایش بهره‌وری این فرایند وابسته به پارامترهای بسیاری است که از تأثیرگذارترین آنها افزایش ترکیب نسبی متان زیست‌گاز است. زیست‌متان تولیدی از دسته انرژی‌های تجدیدپذیر و سبز با قابلیت جایگزینی سوخت‌های فسیلی است. همچنین رشد صنعت و فناوری و مصرف روزافزون سوخت‌های فسیلی بعنوان منابع متناهی و تجدیدناپذیر انرژی از یکسو و تأثیرات مخرب زیست محیطی ناشی از مصرف آن‌ها با جایگزینی بیومتان در بعضی کاربردها تعدیل‌پذیر است [۸، ۷]. همچنین فرایند هضم بی‌هوازی روشی برای تبدیل فضولات خام حیوانی به کودهای کشاورزی مایع و جامد مغذی به همراه تولید زیست‌گاز است [۹]. تولید بیومتان در فرایند هضم بی‌هوازی تابع عامل‌هایی مانند نوع و ترکیب خوراک، پیش‌فرآورش خوراک، زمان اقامت خوراک در هاضم، شرایط دمای فرایند، نوع راکتور هضم، اختلاط، فشار، عملیاتی و ... است [۱۱، ۱۰].

با توجه به این که فرایند هضم بی‌هوازی دارای یک مکانیسم پیچیده در سه فاز جامد، مایع و گاز است و فشار یک عامل مؤثر بویژه در فاز گازی است (در واقع بر روند تولید زیست‌گاز و ترکیب نسبی آن همانند زیست‌متان)، بنابراین چگونگی تخلیه زیست‌گاز تولیدی نیز از عوامل تأثیرگذار بر فرایند هضم بی‌هوازی خواهد بود. تجمع زیست‌گاز تولیدی در درون هاضم موجب افزایش فشار عملیاتی می‌شود. مکانیسم هضم بی‌هوازی شامل چهار مرحله هیدرولیز، اسیدزایی، استون‌زایی و متان‌زایی است [۱۰، ۷]. به‌جز مرحله نخست (هیدرولیز) سایر مرحله‌ها همراه با تولید گاز است. بدین ترتیب چگونگی تخلیه و فشار ناشی از تجمع زیست‌گاز تولیدی بر روی مراحل هضم بی‌هوازی و سرانجام میزان و ترکیب نسبی آن اثرگذار خواهد بود. مطالعات و پژوهش‌های اندکی در این زمینه و مبحث اثرگذاری فشار عملیاتی موجود است. به‌طور مختصر به نتیجه‌های این پژوهش‌ها اشاره می‌شود: افزایش فشار جزئی گاز هیدروژن فرایند هیدرولیز خوراک را کاهش می‌دهد. در صورت اضافه شدن گاز CO₂ به H₂ این اثر جلوگیری‌کنندگی از بین می‌رود [۱۲]. افزایش فشار هیدرو استاتیکی تجزیه مواد آلی

ماده هضم‌شده مرحله قبل و فضولات گاوی بود. البته گاهی برای کنترل pH محیط سوبسترا از محلول‌های قلیایی و/یا اسیدی نیز استفاده می‌شد.

روش آزمایش

به منظور بررسی تأثیر چگونگی تخلیه زیست‌گاز تولیدی و فشار ناشی از تجمع زیست‌گاز تولیدی بر روی فرایند هضم بی‌هوازی سه روش آزمایش در شرایط مزوفیلیک انجام شد.

روش اول: سامانه بطور کاملاً بسته^۱ تنظیم شد. طی فرایند ۳۴ روزه هضم بی‌هوازی زیست‌گاز تولیدی درون هاضم انباشته و تخلیه پایان فرایند انجام شد. برای تحقق این مسئله شیر فشار شکن روی فشار ۴ bar_g تنظیم شد. ۸ kg خوراک شامل پسماندهای جامد آلی خانگی خرد شده، ماده هضم شده مرحله قبل، فضولات گاوی و آب به نسبت مساوی باهم مخلوط شد. ۲۰۰ g از این مخلوط برای تست‌های خوراک جدا و مابقی وارد مخزن هاضم شد. برای ایجاد شرایط بی‌هوازی کل سامانه از طریق پمپ خلاء تحت مکش و تخلیه هوا تا فشار ۰/۷۵ bar_g - قرار گرفت. پس از ایجاد خلاء نسبی شیر اتصال پمپ خلاء به سامانه بسته شد. دمای حمام بن‌ماری ۴۰ °C تنظیم شد. برای اختلاط سوبسترا، به منظور جلوگیری از لایه‌لایه شدن، ایجاد غلظت یکنواخت و کمک به خروج زیست‌گاز از فاز مایع و جامد همزن بصورت ناپیوسته با دور متوسط ۱۰ rpm برای سه روز در هفته هر بار بین ۳-۴ ساعت تنظیم شد. فرایند زیست‌شیمیایی هضم بی‌هوازی همراه با تولید زیست‌گاز و افزایش فشار نسبی درون مخزن هضم شروع می‌شود. طی دوره هضم بی‌هوازی فشار به یک میزان بیشینه ۱/۱ bar_g صعود کرد، سپس کاهش یافت و سرانجام در یک مقدار حداقل ۰/۱ bar_g ثابت باقی ماند. در این زمان مخزن نمونه‌گیر از سامانه برای آنالیز زیست‌گاز تولیدی جدا شد. پس از تخلیه زیست‌گاز تولیدی از سامانه درب هاضم باز و ۲۰۰ g از ماده هضم شده درون هاضم برای انجام تست‌های لازم جدا شد. هاضم برای انجام روش بعدی آزمایش بطور کامل تخلیه شد.

روش دوم: سامانه نسبت به خروج زیست‌گاز بطور نیمه‌پیوسته^۲ تنظیم شد. تخلیه بیوگاز تولیدی خلال فرایند هضم بی‌هوازی طی دوره‌های ۱۴ روزه انجام شد. تمامی شرایط کاری و فرایندی مطابق روش اول بود با این تفاوت که شیر فشار شکن روی فشار ۱/۵ bar_g تنظیم شد و پس از رسیدن فشار زیست‌گاز تولیدی به میزان بیشینه که با نزول فشار یا ثابت ماندن قطعی می‌شد، زیست‌گاز تولیدی انباشته‌شده درون سامانه از طریق پمپ خلاء تخلیه و فشار دوباره



شکل ۱- مجموعه دستگاهی هضم بی‌هوازی

بخش اصلی، مخزن هاضم برای گرمایش بصورت دو جداره طراحی و ساخته شده و به منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی با لایه‌ای از پشم شیشه عایق شده است. از یک حمام آب بن‌ماری مدل Memmert, D91126 برای گرمایش سیال گرم‌کننده استفاده شده است. به منظور اختلاط مواد درون هاضم از یک همزن استفاده می‌شود که شدت جریان و ولتاژ لازم برای چرخش بوسیله یک دستگاه منبع تغذیه برق DC مدل GWINSTEK, GPS-3303C تامین می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای مواد درون هاضم از یک ترموکوپل استفاده شده است که دمای اندازه‌گیری شده روی یک صفحه نمایشگر با دقت $\pm 1/1$ °C قابل دیدن است. به وسیله یک فشارسنج مدل WINTERS, 1953 فشار درون هاضم و زیست‌گاز تولیدی اندازه‌گیری می‌شود. برای ایجاد شرایط بی‌هوازی و تخلیه هوای درون سامانه/تخلیه زیست‌گاز تولیدی در پایان یا خلال فرایند از یک پمپ خلاء مدل PLATINUM, JB, 60507 استفاده شده است. یک خروجی از پمپ خلاء برای تست شعله به فلر متصل شده است. برای انجام آنالیزهای فاز گازی و آزمایش‌های مربوطه دو مخزن یکی به حجم حدود ۱۳ میلی‌لیتر و دیگری به حجم تقریبی ۲ لیتر در سامانه لحاظ شده است. بیوگاز تولیدی با مسیر متصل به شیر اطمینان از سامانه تخلیه و به درون یک مخزن ۲۵۰ لیتری پلی اتیلنی هدایت می‌شود.

مواد

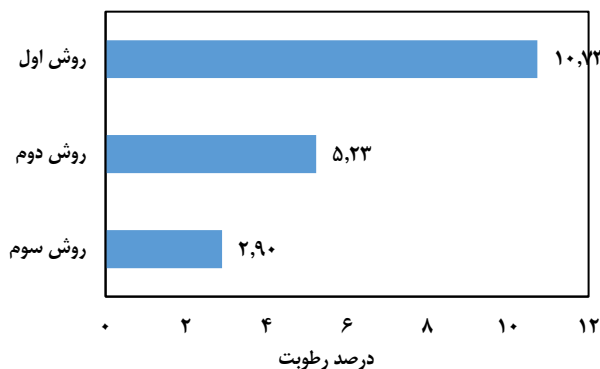
به‌طور عمده خوراک فرایند هضم ماده اصلی مورد نیاز سامانه است. خوراک ترکیبی از مواد آلی تجزیه پذیر شامل پسماندهای جامد آلی خانگی،

(۱) Batch

(۲) Semi Batch

جدول ۱- ترکیب درصد رطوبت، بخش خشک، بخش آلی، خاکستر خوراک و فراورده هضم شده

| عنوان | روش اول | | روش دوم | | روش سوم | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | خوراک | هضم شده | خوراک | هضم شده | خوراک | هضم شده |
| رطوبت % | ۷۵/۸۶ | ۸۴ | ۸۶/۲ | ۹۰/۷۱ | ۸۶/۶۲ | ۸۹/۱۳ |
| بخش خشک % | ۳۴/۱۴ | ۱۶ | ۱۳/۸ | ۹/۲۹ | ۱۳/۳۸ | ۱۰/۸۷ |
| بخش آلی % | ۲۰/۲۳ | ۱۵/۸۱ | ۱۲/۵۰ | ۷/۹۲ | ۱۱/۹۷ | ۹/۴۴ |
| خاکستر % | ۳/۹۱ | ۰/۱۹ | ۱/۳۰ | ۱/۳۷ | ۱/۴۱ | ۱/۴۳ |



شکل ۲- افزایش درصد رطوبت در روش‌های آزمایشی

نتیجه‌ها و بحث

در هر سه روش مقادیر ترکیب درصد رطوبت، خاکستر، بخش آلی و بخش خشک خوراک و فراورده هضم شده اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۱ ارایه شده است. مواد (خوراک و فراورده هضم شده) از دو بخش خشک و رطوبت تشکیل می‌شوند. بخش خشک شامل بخش آلی و خاکستر است. با مقایسه درصد رطوبت خوراک و فراورده هضم شده برای هر سه روش و افزایش مقدار آن در فراورده هضم شده نسبت به خوراک مشخص است، بخشی از خوراک طی فرایند تولید زیست‌گاز به آب تبدیل شده است. مطابق شکل ۲ افزایش ترکیب درصد رطوبت روش‌ها به ترتیب ۷۳٪/۱۰، ۲۳٪/۵ و ۲۹٪/۲ است. مطابق واکنش (۱) تولید آب در فرایند هضم بی‌هوازی می‌تواند نشان از فعالیت میکروارگانیسم‌های متان‌زا باشد [۱۰].



بخش خشک از دو قسمت بخش آلی و خاکستر تشکیل می‌شود. بخش آلی قابلیت تبدیل و تجزیه در فرایند هضم بی‌هوازی بواسطه فعالیت میکروارگانیسم‌ها را دارا است. خاکستر می‌تواند شامل

به $0/75 \text{ bar}_g$ رسانیده و فرایند ادامه می‌یافت. این عمل طی دوره هضم بی‌هوازی ۴۵ روزه دو بار تکرار شد. تغییرهای فشار زیست‌گاز تولیدی هر مرحله به ترتیب $0/75$ تا $0/65$ ، $0/75$ تا $0/05$ و $0/75$ تا 0 بود. مرحله آخر با تثبیت فشار بیشینه زیست‌گاز تولیدی در 0 bar_g فرایند پایان یافت. همچنین در هر مرحله قبل از تخلیه زیست‌گاز، مخزن نمونه‌گیر گاز برای بررسی ترکیب نسبی زیست‌گاز تولیدی از سامانه جدا و پس از انجام آنالیز دوباره نصب می‌شد. روش سوم: سامانه نسبت به خروج زیست‌گاز پیوسته^۱ تنظیم شد. تخلیه بیوگاز تولیدی بصورت پیوسته طی فرایند هضم بی‌هوازی انجام شد. برای این کار شیر اطمینان روی فشار $0/25 \text{ bar}_g$ تنظیم شد. سایر پارامترها و مراحل مشابه روش اول بود. فرایند هضم بی‌هوازی به مدت ۴۰ روز به طول انجامید. فشار بیوگاز تولیدی از خلاء اولیه $0/75 \text{ bar}_g$ تا فشار بیشینه $0/42 \text{ bar}_g$ همراه با خروج شدید بیوگاز از مسیر شیر اطمینان و نزول آن به صورت تدریجی تا فشار حداقل $0/2 \text{ bar}_g$ ادامه یافت. در پایان مخزن نمونه‌گیر برای آنالیز بیوگاز تولیدی از سامانه جدا شد.

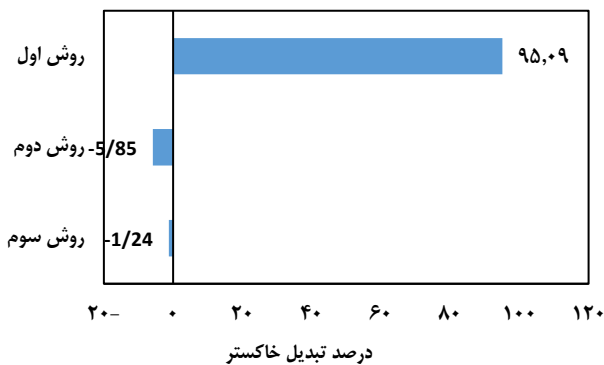
روش آنالیز نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر هر یک از روش‌ها روی فرایند هضم بی‌هوازی لازم به بررسی پارامترهایی در خوراک و فراورده‌های به‌دست آمده از هضم شامل زیست‌گاز و فراورده هضم شده است. این آنالیزها به دو دسته شیمی فیزیکی و دستگاهی جدا می‌شوند. پارامترهای مورد نظر شامل شناسایی و اندازه‌گیری ترکیب نسبی خوراک، فراورده هضم شده و بیوگاز است. پارامترهای موردسنجش خوراک و فراورده هضم شده مشترک و همانند است که برخی به روش شیمی فیزیکی و برخی دیگر از طریق دستگاهی اندازه‌گیری شدند. پارامترهای شیمی فیزیکی شامل درصد رطوبت، درصد بخش خشک، درصد خاکستر و درصد بخش آلی است که براساس استانداردهای ملی با شماره‌های ۱۰۷۱۶، ۱۶۷۷ و ۱۳۳۲۰ اندازه‌گیری شد [۲۷-۲۵]. همچنین ترکیب نسبی خوراک و فراورده هضم شده شامل کربن، نیتروژن، هیدروژن و گوگرد با استفاده از دستگاه آنالیز عنصری مدل Costech, instruments elemental combustion system و Eager 300 for EA1112 اندازه‌گیری شد. ترکیب نسبی بیوگاز نیز با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) با ستون HP-PLOT Q مدل DG1DCE40DE اندازه‌گیری شد.

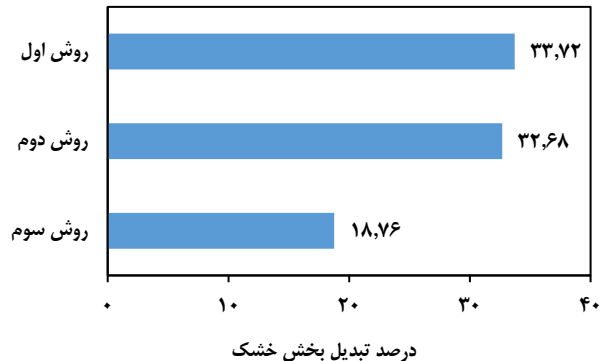
(۱) Continues



شکل ۳- درصد تبدیل بخش آلی روش‌های آزمایشی



شکل ۴- درصد تبدیل خاکستر روش‌های آزمایشی



شکل ۵- درصد تبدیل بخش خشک روش‌های آزمایشی

شایان یادآوری دوباره است که بخش خشک شامل بخش آلی و خاکستر است. هرچند درصد تبدیل بخش آلی روش اول و سوم به تقریب معادل هم‌دیگر است ولی درصد تبدیل بالای خاکستر در روش اول سبب می‌شود میزان درصد تبدیل بخش خشک در روش اول نسبت به روش سوم میزان چشمگیری بیش‌تر باشد.

عنصرها و ترکیب‌های نشان‌دار^۱ مورد نیاز رشد و تکثیر میکرو ارگانیسم‌ها برای فرایند هضم باشد و/یا در فرایند هضم تخریب و تجزیه نشده و به‌عنوان بخش هضم شده در هاضم باقی بماند. بنابراین کاهش ترکیب درصد بخش آلی هضم شده نسبت به خوراک متناسب با میزان پیشرفت فرایند هضم بی‌هوازی در جهت تولید زیست‌گاز خواهد بود. همچنین میزان کاهش ترکیب درصد خاکستر در هضم شده نسبت به خوراک موید مصرف بخشی از خاکستر بعنوان عنصرها و ترکیب‌های نشان‌دار مورد نیاز برای رشد و تکثیر میکرو ارگانیسم‌ها در فرایند هضم است. مطابق نتیجه‌های آورده‌شده جدول ۱ و شکل‌های ۳ و ۴، میزان درصد تبدیل ماده آلی^۲ خوراک نسبت به هضم شده در هر سه روش به ترتیب ۲۱/۸۶، ۳۶/۶۸ و ۲۱/۱۲٪ و برای خاکستر به ترتیب ۹۵/۰۹، ۵/۸۵- و ۱/۲۴-٪ برآورد می‌شود. علامت منفی میزان درصد تبدیل خاکستر به معنای افزایش ترکیب درصد خاکستر فرآورده هضم شده نسبت به خوراک است. این ناشی از دو دلیل عمده است: اول، میزان تبدیل بخش آلی خوراک طی فرایند هضم بی‌هوازی در اثر فعالیت میکرو ارگانیسم‌ها بقدری بالا است که سرانجام مقدار باقی‌مانده آن در فرآورده هضم شده نسبت به بخش خاکستر کم‌تر است. دوم، مقدار کمی از خاکستر شامل ترکیبات نشان‌دار و عنصرهای مورد نیاز رشد و تکثیر میکرو ارگانیسم بوده یا میزان کمی تحت این عنوان طی فرایند هضم بی‌هوازی مصرف شده است. درصد تبدیل خاکستر^۳ روش اول برعکس روش‌های دوم و سوم مقدار قابل ملاحظه ۹۵/۰۹ اندازه‌گیری شده است یعنی بخش اصلی خاکستر موجود در خوراک طی فرایند هضم بی‌هوازی مصرف شده است. باتوجه به این‌که ترکیب درصد بخش آلی روش‌های اول و سوم به‌تقریب به هم نزدیک است و فرایند روش اول در شرایط کاملاً بسته انجام می‌شود و در برابر روش سوم تحت شرایط پیوسته است. می‌توان نتیجه‌گیری نمود بخش اصلی خاکستر روش اول شامل ترکیب‌های نشان‌دار و عنصرها مورد نیاز رشد و تکثیر میکرو ارگانیسم بوده که سبب تجزیه و هضم مواد آلی شده ولی در روش سوم آنچه باعث افزایش درصد تبدیل بخش آلی شده است شرایط سامانه است.

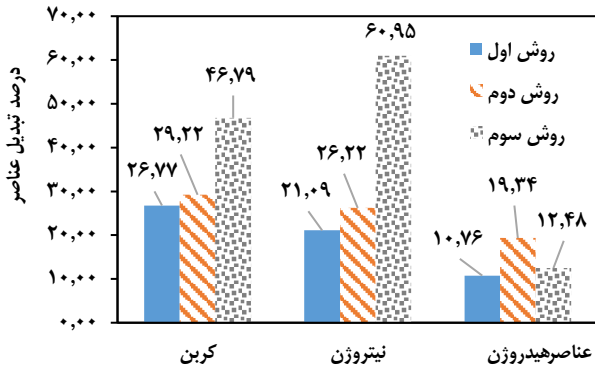
شکل ۵ درصد تبدیل بخش خشک^۴ را در روش‌ها نشان می‌دهد. مطابق این شکل درصد تبدیل بخش خشک در روش‌های ۱ تا ۳ به ترتیب ۳۳/۷۲، ۳۲/۶۸ و ۱۸/۷۶ اندازه‌گیری شده است.

(۳) کسری از خاکستر خوراک که در فرایند هضم بی‌هوازی به زیست‌گاز تبدیل شده است.
(۴) کسری از بخش خشک خوراک که در نتیجه فرایند هضم بی‌هوازی به زیست‌گاز تبدیل شده است.

(۱) Tracer موادی مشابه کبالت □ نیکل □ آهن □ منگنز □ مس و... که میکرو ارگانیسم‌های چهارگانه فرایند هضم بی‌هوازی مقدار جزئی به آنها نیاز دارند.
(۲) کسری از بخش آلی خوراک که در فرایند هضم بی‌هوازی به زیست‌گاز تبدیل شده است.

جدول ۲- ترکیب درصد عنصرها کربن، نیتروژن و هیدروژن در خوراک و فراورده هضم شده

| درصد عنصرها | روش اول | | روش دوم | | روش سوم | |
|-------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
| | خوراک | فراورده هضم شده | خوراک | فراورده هضم شده | خوراک | فراورده هضم شده |
| کربن | ۴۵/۹۸ | ۳۳/۶۷ | ۵۴/۹۳ | ۳۸/۸۸ | ۴۲/۴۲ | ۲۲/۵۷ |
| نیتروژن | ۵/۸۸ | ۴/۶۴ | ۳/۷ | ۲/۷۳ | ۴/۶۱ | ۱/۸ |
| هیدروژن | ۵/۶۷ | ۵/۰۶ | ۶/۹۸ | ۵/۶۳ | ۵/۹۳ | ۵/۱۹ |

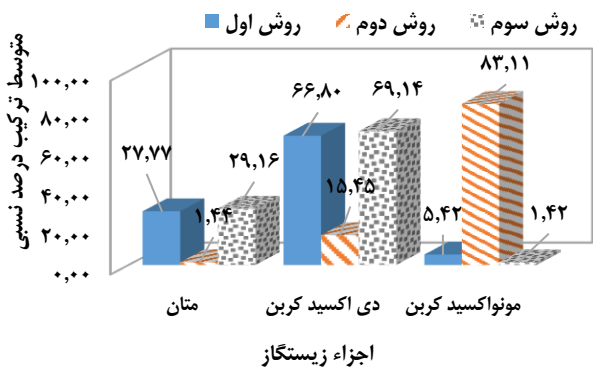


شکل ۶- مقایسه درصد تبدیل عنصرها کربن، نیتروژن و هیدروژن در روش‌های آزمایشی

و زیست‌گاز تخلیه می‌شود. پس فشار سامانه در این روش از مقدار بیشینه گزارش شده در بخش روش انجام کار تجاوز نمی‌کند. پایین نگاه داشتن فشار موجود در مخزن هضم بی‌هوازی با خروج تدریجی بیوگاز سبب می‌شود علاوه بر این که محیط سوبسترا بدون تنش برای انطباق میکروارگانیسم‌ها فراهم‌شود، فرایند هیدرولیز مولکول‌ها و ترکیبات خوراک نیز به‌طور مداوم انجام شود.

شکل ۷ میزان فشار نسبی روزانه زیست‌گاز تولیدی را به ازای واحد جرم خوراک در هر روش از آزمایش نشان می‌دهد. روش اول فرایند از خلاء نسبی حدود 0.1 bar_g - به ازاء واحد جرم خوراک آغاز می‌شود، پس از ۵ روز به مقدار بیشینه 0.14 می‌رسد و به تدریج کاهش می‌یابد تا در روز ۳۲ام که برای حدود یک هفته در مقدار 0.25 ثابت باقی مانده است، متوقف می‌شود. روش دوم فرایند از خلاء نسبی حدود 0.1 bar_g - به ازای واحد جرم خوراک آغاز می‌شود، پس از ۱۲ روز به 0.09 می‌رسد، روز ۱۵ام که افت تدریجی فشار تولیدی زیست‌گاز محرز می‌شود، برای دور اول زیست‌گاز تولیدی از طریق پمپ خلاء تخلیه می‌شود و مجدد فشار سامانه به حدود 0.1 bar_g - به ازای واحد جرم خوراک می‌رسد، فرایند هضم بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز تا فشار 0.07 bar_g - به ازای واحد جرم خوراک ادامه می‌یابد و ثابت

همچنین درصد تبدیل بالای بخش آلی روش دوم نسبت به روش‌های اول و سوم سبب شده با وجود درصد تبدیل منفی خاکستر در این روش، درصد تبدیل بخش خشک به طور تقریبی معادل روش اول شود. کربن، نیتروژن و هیدروژن عنصرها اصلی و ضروری خوراک برای فرایند هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز هستند. بنابراین شناسایی و اندازه‌گیری میزان این عنصرها در خوراک و فراورده هضم شده به ترتیب معیاری از قابلیت خوراک برای تولید بیوگاز و میزان پیشرفت فرایند هضم بی‌هوازی درجهت تولید بیوگاز خواهد بود. کربن برای رشد و تکثیر و نیز نیتروژن برای ساخت دیواره سلولی مورد نیاز است [۲۸ و ۲۷ و ۱۰]. نتیجه آنالیز عنصری خوراک و فراورده هضم شده برای هر سه روش آزمایشی در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۶ میزان درصد تبدیل عنصرها سازنده کربن، نیتروژن و هیدروژن را در روش‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود این مقدار برای کربن در روش‌های ۱ تا ۳ به ترتیب ۲۶/۷۷، ۲۹/۲۲ و ۴۶/۷۹، برای نیتروژن ۲۱/۰۹، ۲۶/۲۲ و ۶۰/۹۵ و برای هیدروژن ۱۰/۷۶، ۱۲/۴۸ و ۱۹/۳۴ برآورد شده است. میزان درصد تبدیل کربن و نیتروژن به ترتیب در روش‌های اول تا سوم افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه سامانه روش اول به کامل بسته است و زیست‌گاز تولیدی درون سامانه انباشته می‌شود و فشار در مخزن هضم افزایش می‌یابد، مشخص می‌شود که افزایش فشار بیوگاز انباشته شده سبب کندی فرایند هضم بی‌هوازی می‌شود، به‌طوری‌که فرایند هیدرولیز ترکیبات اولیه موجود در خوراک شامل قندها، چربی‌ها و پروتئین‌ها اگر متوقف نشود به کندی انجام خواهد شد. سامانه روش دوم نسبت به خروج زیست‌گاز نیمه‌پیوسته است و شیر فشار شکن روی فشار 1.5 bar_g تنظیم شده است و طی دوره‌های ۱۴ روزه زیست‌گاز تولیدی و انباشته شده از سامانه تحت مکش پمپ خلاء تخلیه شده و فشار سامانه به میزان تقریبی اولیه 0.75 bar_g - می‌رسد و فرایند ادامه می‌یابد. میزان درصد تبدیل در این روش نسبت به روش اول بیش‌تر ولی نسبت به روش سوم کم‌تر است پس مشخص است کاهش فشار روی فرایند هیدرولیز ترکیب‌های خوراک تأثیر مثبت دارد ولی با توجه به ایجاد تنش ناگهانی فشار ناشی از تخلیه مکرر زیست‌گاز سبب آشفستگی محیط سوبسترا برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها شده و بدین ترتیب فرایند هضم بی‌هوازی مختل می‌شود. درصدهای تبدیل روش سوم از دو روش پیش بیش‌تر است. سامانه این روش نسبت به خروج زیست‌گاز پیوسته و فشار تنظیمی شیر اطمینان روی 0.25 bar_g است، بنابراین چنانچه فشار زیست‌گاز تولیدی از این مقدار افزایش یابد، شیر اطمینان به‌طور خودکار باز شده



شکل ۸- ترکیب درصد اجزای زیست‌گاز تولیدی در روش‌های آزمایشی

و متان تولیدی در اثر شکسته شدن مولکول‌های استیک اسید به‌دست‌آمده از فرایند اسیدزای موجود در فاز مایع درون هاضم تحت تأثیر میکروارگانیسم‌های متان‌زای استی کلاستیک (مطابق واکنش (۳)) خواهد بود [۱۰].



همچنین ملاحظه می‌شود در این روش درصد ترکیب نسبی مونو اکسید کربن نسبت به کربن دی اکسید بسیار بالا است. دلیل این پدیده را می‌توان بر مبنای اصل لوشاتلیه برای تعدیل فشار توصیف نمود. مطابق واکنش (۴) با کاهش فشار در نتیجه تخلیه بیوگاز از مخزن هاضم کربن دی اکسید به اکسیژن و کربن مونو اکسید تبدیل می‌شود.



همچنین بالا بودن درصد ترکیب نسبی متان روش سوم نسبت به روش دوم می‌تواند ناشی از پیشرفت واکنش‌های چهارگانه هضم بی‌هوازی شامل هیدرولیز، اسیدزایی، استون‌زایی و متان‌زایی در اثر تخلیه تدریجی زیست‌گاز تولیدی از سامانه و پایین نگاه داشتن فشار نسبی موجود در مخزن هضم باشد. حجم زیست‌گاز تولیدی در شرایط نرمال مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۲۹]:

$$V_0 = \frac{T_0}{T} \times \frac{P}{P_0} \times V \quad (۵)$$

که:

$$T_0 = \text{دمای نرمال} = 20^\circ\text{C} = 293/15 \text{ K}$$

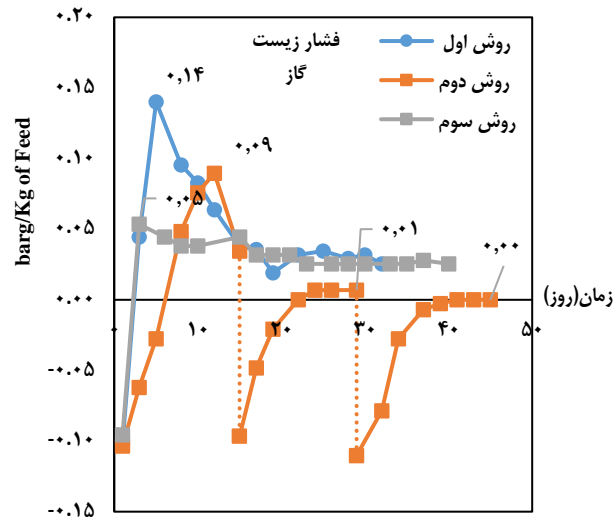
$$T = \text{دمای متوسط مخزن جمع آوری کننده زیست‌گاز} = 20^\circ\text{C}$$

$$P = \text{فشار مطلق زیست‌گاز جمع آوری شده بر حسب بار} = P_g + 1$$

$$P_g = \text{فشار نسبی زیست‌گاز در مخزن جمع آوری کننده}$$

$$P_0 = \text{فشار شرایط نرمال معادل} = 1 \text{ بار}$$

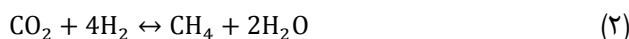
$$V = \text{حجم مخزن جمع آوری کننده زیست‌گاز تولیدی} = 250 \text{ لیتر}$$



شکل ۷- فشار روزانه زیست‌گاز تولیدی به ازاء واحد جرم خوراک

باقی می‌ماند این دوره ۱۵ روز به‌طول می‌انجامد سپس دوباره زیست‌گاز تولیدی سامانه همانند دور اول تخلیه و ادامه فرایند برای دور سوم از فشار 0.1 barg به ازای واحد جرم خوراک ادامه می‌یابد و فرایند تولید زیست‌گاز تا فشار نسبی صفر پیش می‌رود. پس از پایان دور سوم که روز ۴۵ از شروع فرایند با خوراک دهی بطول می‌انجامد، فرایند مربوط به روش آزمایش دوم تکمیل و خاتمه می‌یابد. روش سوم نیز همانند دو روش قبلی فرایند تحت خلاء نسبی 0.1 barg به ازای واحد جرم خوراک شروع و پس از ۳ روز فشار بیوگاز تولیدی به میزان بیشینه 0.054 barg به ازاء واحد جرم خوراک می‌رسد و سپس سیر تدریجی نزول فشار بیوگاز تولیدی و تثبیت آن در فشار 0.25 barg به ازاء واحد جرم خوراک تا روز ۴۰ ام ادامه می‌یابد.

شکل ۸ درصد ترکیب نسبی زیست‌گاز را در هر یک از روش‌ها نشان می‌دهد. مطابق شکل این اجزاء که شامل متان (CH_4)، دی‌اکسید کربن (CO_2) و مونواکسید کربن (CO) است برای روش‌های ۱ تا ۳ به ترتیب عبارت است از: $27/77$ ، $66/80$ ، $5/42$ ، $1/4$ ، $15/45$ ، $83/11$ و $29/16$ ، $69/14$ ، $1/42$ دیده می‌شود که کم‌ترین میزان متان مربوط به روش دوم است. چون طی ۱۵ روز نخست فرایند هیدرولیز و اسیدوژنیک انجام و فرآورده‌های مانند کربن دی‌اکسید و گاز هیدروژن تولید می‌شود، لیکن به دلیل تخلیه زیست‌گاز تولیدی گاز هیدروژن و کربن دی‌اکسید (مطابق واکنش (۲)) فرصت تبدیل به متان را در حضور میکروارگانیسم‌های متان‌زا پیدا نمی‌کنند و این فرایند برای روش‌های دوم و سوم نیز تکرار می‌شود.



جدول ۳- مقایسه درصد تغییرهای حجم زیست‌گاز و متان تولیدی

روش‌های ۱ تا ۳

| درصد تغییرات حجم | روش ۳ نسبت به ۲ | روش ۳ نسبت به ۱ | روش ۲ نسبت به ۱ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| زیست‌گاز | ۹/۶۴ | ۱۵/۵۳ | ۵/۳۷ |
| متان | ۲۱۲۰/۲۲ | ۲۱/۳۱ | -۹۴/۵۴ |

با مقایسه سامانه و مجموعه دستگاهی مورد استفاده در این پژوهش و نتایج حاصل نسبت به پژوهش‌های همانند پیشین چند نکته دارای اهمیت است که برتری و ویژگی این اثر را نشان می‌دهد:

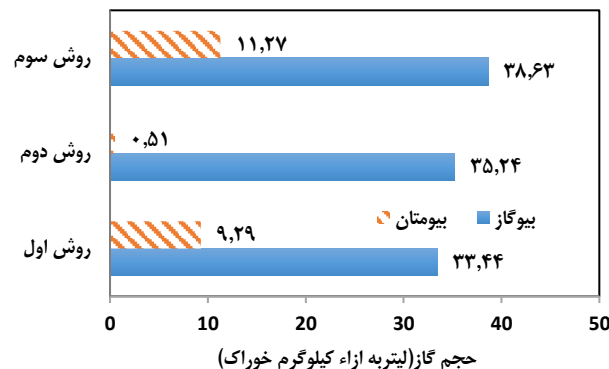
- مجموعه دستگاهی طراحی شده و بکار رفته مقیاس کوچکی از یک نمونه واقعی صنعتی است و قابلیت تبدیل به مقیاس‌های بزرگ تجاری را دارا است.

- خوراک مورد استفاده پسماندهای آلی شهری و فضولات حیوانی است که گامی بزرگ در راستای مدیریت بخش بزرگ پسماندهای شهری و کشاورزی محسوب می‌شود که می‌تواند محیط زیست را از بند بزرگ‌ترین چالش‌های عصر خود برهاند.

- مجموعه نتایج آنالیزها و آزمایش‌های شیمی فیزیکی و دستگاهی روی نمونه‌های خوراک و فرآورده‌ها بر مبنای استانداردهای معتبر بصورت توأم کمک به تصمیم‌گیری و استنتاج صریح در خصوص روش‌های انجام شده می‌نماید.

نتیجه‌گیری

با عنایت بر این که فرایند هضم بی‌هوازی با تولید زیست‌گاز همراه است، فشار از جمله پارامترهای مهم مؤثر بر فرایند خواهد بود. چگونگی تخلیه زیست‌گاز تولیدی هم بر نوع سامانه و هم بر فشار عملیاتی تأثیر گذار است که هر دو بر فرایند هضم بی‌هوازی و کیفیت و کمیت زیست‌گاز تولیدی اثر دارند. با این وجود پژوهش‌های اندکی درباره تأثیر فشار بر فرایند هضم بی‌هوازی در مراجع ثبت شده است و به تقریب هیچ پژوهشی راجع به چگونگی تخلیه زیست‌گاز تولیدی وجود ندارد. بنابراین بر آن شدیم که تأثیر چگونگی تخلیه زیست‌گاز تولیدی را در مجموعه دستگاهی هضم بی‌هوازی مقیاس آزمایشگاهی بر روی فرایند تولید زیست‌گاز با رویکرد صنعتی مورد بررسی قرار دهیم. در این پژوهش سه روش گوناگون تخلیه زیست‌گاز انجام شد. روش اول هضم بی‌هوازی در یک سامانه کاملاً بسته انجام شد؛ زیست‌گاز تولیدی درون سامانه و بالای مخزن هضم جمع می‌شد؛ فشار زیست‌گاز تولیدی از خلاء نسبی حدود $0/1 \text{ bar}_g$ به ازاء واحد جرم خوراک به تدریج افزایش می‌یافت و طی ۵ روز پس از رسیدن



شکل ۹- حجم نرمال زیست‌گاز و زیست‌متان تولیدی به ازاء واحد جرم خوراک روش‌های آزمایشی

حجم زیست‌گاز تولیدی جمع آوری شده به ازاء واحد جرم خوراک در شرایط نرمال برای هر سه روش آزمایش مطابق رابطه فوق محاسبه و نمودار آن مطابق شکل ۹ رسم شد. بر اساس نتایج محاسبه شده و مندرج شکل ۹ حجم نرمال زیست‌گاز تولیدی در روش‌های ۱ تا ۳ به ترتیب: $33/44$ ، $35/24$ و $38/63$ لیتر به ازاء واحد جرم خوراک است. با توجه به اینکه T_0 ، T ، P_0 و V در هر روش از آزمایش تقریباً ثابت است پس حجم زیست‌گاز تولیدی جمع آوری شده در شرایط نرمال تابع مستقیمی از فشار مطلق زیست‌گاز جمع آوری شده، خواهد بود. همچنین بر مبنای ترکیب نسبی زیست‌گاز تولیدی که در شکل ۸ نمایش داده شده است، میزان حجم متان از این مقدار زیست‌گاز تولیدی در هر یک از روش‌های ۱ تا ۳ به ترتیب: $9/29$ ، $0/51$ و $11/27$ لیتر به ازاء واحد جرم خوراک تخمین زده می‌شود که در شکل ۹ مشخص شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از آزمایش روش سوم بیشترین حجم زیست‌گاز تولیدی و بالاترین ترکیب نسبی متان را دارد. پس خروج تدریجی زیست‌گاز تولیدی از سامانه و مخزن هضم تأثیر مثبت بر روند تولید حجمی زیست‌گاز و نیز افزایش سهم متان از زیست‌گاز تولید شده دارد که بر مبنای تفسیر نتایج شکل‌های ۶-۸ قابل استدلال است.

جدول ۳ درصد تغییرات حجم زیست‌گاز و متان تولیدی در هر سه روش آزمایشی را نشان می‌دهد. حجم زیست‌گاز تولیدی روش سوم نسبت به روش‌های دوم و اول به ترتیب $9/64$ و $15/53$ درصد افزایش یافته است و این افزایش برای روش دوم نسبت به اول $5/37$ درصد است. همچنین میزان افزایش متان تولیدی روش سوم نسبت به دوم و اول به ترتیب $2120/22$ و $21/31$ درصد است در حالی که متان تولیدی روش دوم نسبت به اول $94/54$ درصد کاهش می‌یابد.

به‌عنوان خوراک مرحله بعدی برای انجام فرایندهای بیوشیمیایی در تعادل باشد. یکنواختی خروج بیوگاز و فشار پایین حاکم بر فرایند موجب یکنواختی محیط انجام فرایند برای میکروارگانیسم‌ها به‌ویژه متان‌زها خواهد شد. در نتیجه روش تخلیه تدریجی زیست‌گاز تولیدی (روش پیوسته نسبت به خروج زیست‌گاز) و فشار پایین زیست‌گاز تولیدی ناشی از عدم تجمع و انباشتگی آن درون مخزن هضم در خلال فرایند هضم بی‌هوازی بهترین عملکرد را از لحاظ حجم زیست‌گاز و متان تولیدی دربر خواهد داشت.

ق‌دردانی

این پژوهش در مجتمع آزمایشگاهی-تحقیقاتی پروفیسور حسابی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر واقع در روستای چیچکلو شهرستان اسلامشهر انجام شده است. بنابراین بر خود فرض می‌دانم از مجموعه همکاران مستقر در این مجموعه شامل همکاران و کارشناسان محترم و خدوم بخش‌های حراست، آزمایشگاهی، فنی، تاسیسات و مدیریت که در به ثمر رسیدن و انجام مراحل آزمایشگاهی این پژوهش بنده را یاری فرمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴

به بیشینه ۰/۱۴ در مدت ۲۰ روز سیر تدریجی نزولی را طی کرده و پس از ثابت باقی ماندن در ۰/۲۵ برای یک هفته فرایند متوقف شد. طی این مدت ۳۳/۴۴ لیتر زیست‌گاز به‌ازای واحد جرم خوراک با ترکیب نسبی متان ۲۷/۷۷٪ معادل ۹/۲۹ لیتر از کل حجم زیست‌گاز تولید شد. روش دوم سامانه نسبت به خروج زیست‌گاز نیمه پیوسته بود و زیست‌گاز تولیدی طی ۳ مرحله پس از رسیدن به مقدار بیشینه تخلیه می‌شد. این فرایند طی ۴۵ روز در ۳ بازه ۱۵ روزه و پیک بیشینه زیست‌گاز تولیدی به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۰۷ و ۰/۰ به‌ازای واحد جرم خوراک انجام شد. کل حجم زیست‌گاز تولیدی در شرایط نرمال به‌ازای واحد جرم خوراک ۳۵/۲۴ لیتر با ترکیب نسبی متان ۱/۴۴٪ و حجم ۰/۵۱ لیتر از کل بود. روش سوم سامانه به لحاظ خروج زیست‌گاز تولیدی بصورت پیوسته لحاظ شد. فشار زیست‌گاز تولیدی طی ۳ روز به میزان بیشینه ۰/۰۵۴ bar_g به‌ازای واحد جرم خوراک رسید. خروج زیست‌گاز تولیدی بصورت تدریجی طی دوره فرایند هضم بی‌هوازی برای ۴۰ روز انجام شد. ۳۸/۶۳ لیتر زیست‌گاز در شرایط نرمال به‌ازای واحد جرم خوراک در این دوره تولید شد که با ترکیب نسبی متان ۲۹/۱۶٪، ۱۱/۲۷ لیتر آن متان بود.

برمبنای مبحث‌های مطرح شده، مشخص می‌شود که سامانه پیوسته و خروج تدریجی زیست‌گاز تولیدی سبب می‌شود فرایند در فشار پایین و یکنواخت انجام شود. در این شرایط مراحل چهار گانه هضم بی‌هوازی سلسله وار انجام می‌شود، طوری که فرآورده یک مرحله

مراجع

- [۱] علیرضا نورپور، هادی افراسیابی، سید مجید داودی، "بررسی فرایند مدیریت پسماند در جهان و ایران"، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، گزارش شماره ۲۰۷، شهریور (۱۳۹۲).
- [۲] نوروزیان باغانی عباس، دهقانی سمیه، فرزادکیا مهدی، دلیخون مهدیه، امام جمعه محمد مهدی، بررسی مقایسه‌ای نرخ تولید و ترکیب پسماند جامد در شهر شیراز، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی قزوین، (۲) ۲۱: ۵۷ و ۵۶ (۱۳۹۶).
- [۳] عابدین زاده نیلوفر، روانبخش مکرم، عابدی طوبی، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی محل دفن بهداشتی - مهندسی پسماندهای شهری شهرستان سمنان، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، (۲) ۱۵: ۱۱۷ تا ۱۰۵ (۱۳۹۲).
- [۴] احمد پوراحمد، رقیه حیدری، بررسی آلودگی‌های زیست‌محیطی در کشورهای جهان اسلام، فصلنامه پژوهش‌های سیاسی جهان اسلام، (۱) ۶: ۱۴۳ تا ۱۷۰ (۱۳۹۵).

- [5] Fahim F., Shayegan J., [CO₂ Measurement of Synthetic Biogas by Passing It Through Dilute NaOH Solution](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **39(3)**: 107-116 (2020).
- [۶] ثنایی مقدم، اکبر؛ محمدرضا آراین نژاد؛ مسعود علیزاده و علی نجفی، بررسی تولید انرژی از پسماند آلی شهری به روش هضم بی‌هوازی، همایش ملی تولید و بهره برداری از انرژی های نو سازگار با محیط زیست، کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمان (۱۳۹۴).
- [۷] یوسفی لیلا، تأثیر اختلاط هضم شده با پسماندهای جامد آلی شهری در تولید زیست‌گاز از طریق مجموعه دستگاهی هضم بی‌هوازی بسته تحت شرایط مزوفیلیک، نشریه شیمی سبز و فناوریهای پایدار، **۳**: ۶۹ تا ۶۱ (۱۳۹۹).
- [۸] یوسفی لیلا، مطالعه و بررسی الزامات قانونی، فنی و اقتصادی کاربرد زیست‌متان به‌عنوان گاز طبیعی (مطالعه موردی آلمان)، ششمین کنگره ملی تحقیقات راهبردی در شیمی و مهندسی شیمی با تأکید بر فناوری های بومی ایران، انجمن فناوری های بومی ایران، تهران (۱۳۹۸).
- [۹] علیدادی حسین، اعتمادی مشهدی سمیه، نجف پور علی اصغر، محب راد بتول، مطالعه فرآیند تولید زیست‌گاز با استفاده از مخلوط شیرابه زباله شهری و فضولات حیوانی، *مجله تحقیقات سلامت در جامعه*، **(۲)**: ۴ تا ۵۴ (۱۳۹۶).
- [۱۰] یوسفی لیلا، "راهنمای زیست‌گاز (دانش، تولید و کاربردها) بخش اول: منابع زیست‌توده، فرورش خوراک و تولید زیست‌گاز"، انتشارات عطران (۱۳۹۷).
- [۱۱] یوسفی لیلا، مطالعه و بررسی تأثیر شاخص‌های مهم عملیاتی بر طراحی و مهندسی واحدهای زیست‌گاز، پنجمین کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی با رویکرد پیوند انرژی، آب و محیط زیست، انجمن انرژی ایران، تهران (۱۳۹۷).
- [12] Elisabeth Cazier, Eric Trably, Jean-Philippe Steyer, Renaud Escudie., [Biomass Hydrolysis Inhibition at High Hydrogen Partial Pressure in Solid-State Anaerobic Digestion.](#), *Bioresource Technology, Elsevier*, **190**: 106-113. 10.1016/j.biortech.2015.04.055. Hal-01149953v2 (2015).
- [13] CARMEN MATEESCU, [Influence of the Hydrostatic Pressure on Biogas Production in Anaerobic Digesters](#), *Romanian Biotechnological Letters*, **21(5)**: 11941-11948 (2016).
- [14] Y. CHEN, J. J. CHENG, K. S. Creamer, [Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A Review](#), *Bioresource Technology*, **99**: 4044-4064 (2008).
- [15] Teodorita Al Seadi et al., [Biogas Handbook](#). Denmark: University of Southern Denmark, Esbjerg, (2008).
- [16] G. Balachandar, Namita Khanna, and Debebrata Das, "Biohydrogen Production from Organic Waste by Dark Fermentation", *Biohydrogen*. Poland: Elsevier, 103-144 (2013).
- [17] Faatihatur R. Silmi, M. Ramdhan Kirom, A. Qurthobi, "Analysis of the Influence of Internal Pressure Control to the Total Gas Production in Anaerobic Digester", *Engineering Physics International Conference, EPIC 2016, Procedia Engineering*, **170**: 467 - 472 (2017).

- [18] Andreas Lemmer, Wolfgang Merkle, Katharina Baer, Frank Graf, [Effects of High-Pressure Anaerobic Digestion up to 30 Bar on pH-Value, Production Kinetics and Specific Methane Yield](#), *Energy* **138**: 659-667 (2017).
- [19] Shiplu Sarker, Jacob J. Lamb, Dag R. Hjelm and Kristian M. Lien, [A Review of the Role of Critical Parameters in the Design and Operation of Biogas Production Plants](#), *Appl. Sci.*, **9**: 1915; doi:10.3390/app9091915 (2019).
- [20] Petersson A., Wellinger A., [Biogas Upgrading Technologies—Developments and Innovations](#). *IEA Bioenergy*, **20**: 1–19 (2009).
- [21] Vavilin V., Vasiliev V., Rytov S., [Modelling of gas Pressure Effects on Anaerobic Digestion](#). *Bioresour. Technol.*, **52(1)**: 25–32 (1995).
- [22] Singh G., Jain V.K., Singh A., [Effect of Temperature and Other Factors on Anaerobic Digestion Process, Responsible for Bio Gas Production.](#), *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **12(3)**: 637–657 (2017).
- [23] Prajapati B.R., Sharma R.K., Amatya I.M., [Effect of Reduced Gas Pressure on Yield of Biogas and other Physicochemical Parameters](#). *Int. J. Energy. Environ. Eng.* (2020).
- [24] Kasprzycka A., Kuna J., [Methodical Aspects of Biogas Production in Small-Volume Bioreactors in Laboratory Investigations](#). *Energies*, **11(6)**: 1378 (2018).
- [۲۵] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "کمپوست - ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی"، استاندارد ملی ایران ۱۰۷۱۶، چاپ اول.
- [۲۶] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "روش آزمایش تعیین مقدار رطوبت خاک"، استاندارد ملی ایران ۱۶۷۷، چاپ سوم، آذرماه (۱۳۷۰).
- [۲۷] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "کمپوست - نمونه‌برداری و روش‌های آزمون فیزیکی و شیمیایی"، استاندارد ملی ایران ۱۳۳۲۰، چاپ اول.
- [28] Monson K.D., Esteves S.R., Guwy A.J., Dinsdale R.M., [Anaerobic Digestion of Biodegradable Municipal Wastes](#), A review, SERC, (2007).
- [29] Agbede O.O., Aworanti O.A., Osulale F.N., Adebayo A.O., Ogunleye O.O., Agarry S.E., Babatunde K.A, [Anaerobic Conversion of Biodegradable Municipal Solid Waste to Biogas: A Review](#), *Journal of Civil and Environmental Studies*, **3(1)**: (2019).
- [30] David M. Himmelblau, James B. Riggs, "Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering", fifth edition, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, (1989).