یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه هاضم خشک به‌منظور تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی

حسین حاجی‌آقاعلیزاده[1]، علی قاسمی[2]، حسین باریک‌لو[2]

[1]استادیار گروه مهندسی بیوسیستم؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه بوعلی‌سینا همدان؛ H-Alizade@Basu.Ac.Ir

[2]دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی؛ دانشگاه بوعلی‌سینا همدان؛ Alighasemi10@Gmail.Com

[2]دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی؛ دانشگاه بوعلی‌سینا همدان؛ Barikloohossein@Yahoo.Com

چکیده

سالیانه مقدار زیادی از پسماندهای کشاورزی برجای می‌ماند، به دلیل نبود روش‌های مناسب بازیافت، آنها به مسئله مهم زیست‌محیطی تبدیل شده‌اند. در این پژوهش ابتدا دستگاه تولید بیوگاز به روش هاضم خشک ساخته شد، سپس فرآیند تولید گاز از این ضایعات مورد بررسی قرار گرفت. از ترکیب ضایعات طالبی و گوجه‌فرنگی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. سپس مخلوط درون دستگاه هاضم خشک قرار گرفت و در دمای ۳۷ °C به مدت ۳۳ روز نگهداری شد تا مورد هضم باکتری تولید متان قرار گیرد. تغییرات حجم بیوگاز تولیدشده در این آزمایش در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۳ cc و تغییرات pH آن در محدوده ۴ تا ۵ اندازه‌گیری شد. روند تغییرات pH شیرابه ابتدا اسیدی و این روند با گذشت زمان به سمت خنثی شدن گرایش یافت. نتایج نشان داد، روش هاضم خشک برای تولید گاز از ضایعات کشاورزی مناسب می‌باشد که باعث صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی می‌شود.

کلمات کلیدی: بیوگاز، ضایعات کشاورزی و غذایی، هاضم خشک، همزن

Design, fabrication and evaluation of the digester to produce biogas from agricultural waste

Hossein Hajiaghaalizadeh[1], Ali Ghasemi[2], Hossein Barikloo[3]

[1]Associate Professor, Bu Ali Sina University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, h-alizade@basu.ac.ir

[2]Ph.D. Student, Bu Ali Sina University, Department of Biosystems Engineering, alighasemi10@gmail.com

[3]Ph.D. Student, Bu Ali Sina University, Department of Biosystems Engineering, barikloohossein@yahoo.com

ABSTRACT

A large amount of the food waste and agricultural waste generated annually. These wastes can cause problems in the environment. In this study, the dry digestion device designed. Then gas-generating process from waste materials evaluated. For this purpose, the cantaloupe waste and tomato waste mixed. Then the mixture placed inside the digester at 37°C for 33 days to digest by methane-producing bacteria. The latex waste was pumped on the wastes to ameliorate the gas generation (to make gas production faster and more efficiently) every 8 h. The gas pressure and leachate pH measured every day to evaluate the kinetics of gas production. The volume of biogas produced ranged 0.05-0.3 cc and the pH varied between 4 and 5. Acidic pH levels of the leachate tended towards neutral over time. Likewise, stirring of the leachate had a positive effect on gas production. In conclusion, dry (anaerobic) digesters are not only appropriate to produce gas from agricultural waste but also cause economic savings and reduction of environmental pollution.

Keywords: Biogas, Dry Digester, Food and Agricultural Waste, Mixer

---

۱- حسین حاجی آقاعلیزاده، استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا همدان، تلفن: ۰۹۱۸۱۱۱۳۸۳۰.

۱- مقدمه

بیوگاز، گازی سازگار با محیط‌زیست می‌باشد و تولید آن راهکاری مفید برای رفع معضل ضایعات بخش کشاورزی و دامی است (Raininko et al., 1981; Hilkiah Igoni et al., 2008). بیوگاز حاوی ۵۰ تا ۷۰ درصد گاز متان است (Hills and Roberts, 1981) و در مقایسه با گاز طبیعی ارزش حرارتی کمتری دارد که با تصفیه می‌توان کیفیت حرارتی آن را بالا برد. پژوهشگران به‌منظور کاهش زمان تجزیه مواد و ضایعات روش‌هایی را معرفی و پیشنهاد کردند که یکی از آنها انجام پیش‌تیمارهای مکانیکی و فیزیکی مانند آسیاب کردن و خرد کردن مواد اولیه به‌منظور کاهش سطح تماس مواد آلی و کاهش حجم مخزن هضم است (Moorhead and Zhang, 1999; Nordstedt, 1993). همچنین استفاده از روش‌های پیش‌تیمارهای بیولوژیکی نظیر کشت میکروبی و کشت قارچ و قرار دادن مواد اولیه در معرض فعالیت میکروبی محیط کشت (Shi et al., 2009; Singh et al., 2010; Zhong et al., 2011) و یا ترکیبی از دو یا چند روش مانند شیمیایی و حرارتی (Rafique et al., 2010) در تولید بیوگاز قابل استفاده است. تولید بیوگاز تحت تأثیر فاکتورهایی مانند در دسترس بودن مواد مغذی و قابلیت تجزیه‌پذیری سلولز و همی‌سلولز و پیوستگی لیگنین با نتایج متفاوتی ارائه شده است (He et al., 2008; Taherzadeh et al., 2008).

طی سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای روی فرآیند تولید بیوگاز و بررسی اثر متغیرهای مؤثر بر تولید آن انجام گرفته است. دما و pH محیط، زمان فرآیند و ترکیب مواد خام اولیه از جمله عوامل عمده‌ای هستند که بر میزان تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی تأثیر دارند. pH محیط تأثیر زیادی در تکثیر و فعالیت باکتری‌های هضم‌کننده دارد و چنانچه میزان آن به کمتر از ۵/۵ برسد، این باکتری‌ها غیرفعال می‌گردند (Sharam, 2002). برای رفع این مشکل افزودن مقداری ماده قلیایی مانند بی‌کربنات سدیم به محیط هضم، به‌منظور جلوگیری از کاهش ناگهانی pH در ابتدای شروع آزمایش پیشنهاد شده است. همچنین بهترین وضعیت pH برای فعالیت باکتری‌های هضم‌کننده در محدوده بین ۶ تا ۸ پیشنهاد شده است (Alvarez and Liden, 2008). دمای محیط هضم نیز در محدوده ۳۰ تا ۶۰ °C توصیه شده که در درجه حرارت پایین‌تر از ۳۰ °C محیط هضم اسیدی می‌شود و در دمای بالاتر از ۶۰ °C نیز فعالیت باکتری‌های هضم‌کننده کاهش می‌یابد و به تدریج از بین می‌روند (Angelidakki and Ahring, 1994; Yadvika et al., 2004). مقدار بیوگاز تولید شده از یک ماده کشاورزی بستگی به تعداد باکتری‌های هضم‌کننده و مقدار فعالیت آنها دارد. جمعیت و فعالیت باکتری‌ها با گذشت زمان و وجود شرایط مناسب در محیط افزایش می‌یابد. آزمایش‌ها روی ضایعات و بقایای مختلف گیاهی نشان می‌دهد، میزان تولید بیوگاز در ۳ تا ۲۰ روز اول افزایش‌یافته و پس از آن به تدریج کاهش پیدا می‌کند و باقی ماندن بیش از حد مواد غذایی در محیط هضم نیز تأثیری در افزایش تولید بیوگاز نخواهد داشت (Sanchez et al., 1992). اضافه نمودن کود دامی به ضایعات کشاورزی یکی از راه‌های مؤثر در افزایش تولید بیوگاز است. این کار باعث می‌شود که باکتری‌های تولیدکننده بیوگاز در ابتدای فرآیند به‌طور مستقیم وارد محیط هضم شوند و عمل تجزیه مواد زودتر آغاز شود (Al-Masri, 2001). طبق پژوهش‌های انجام شده با اضافه نمودن کود گاوی به بقایای گیاهان ذرت، برنج و پنبه بیوگاز بیشتری تولید گردید (EL-Shinnawi et al., 1989). آزمایش‌های انجام شده روی فرآیند تولید بیوگاز از کنجاله خردل و کود گاوی نشان داد که مخلوط ۳۰ درصد کنجاله خردل با کود، بیوگاز بیشتری نسبت به استفاده از کود تنها تولید کرد (Satyanarayan et al., 2008). پیش‌بینی مقدار بیوگاز تولیدشده از ضایعات مختلف کشاورزی در طول فرآیند هضم نقش بسیاری در بهینه‌سازی و مدیریت این فرآیند دارد. حجم زیادی از زباله‌های میوه و سبزی در بازار تولید می‌شود و به دلیل قابلیت تجزیه بیولوژیک بالای آنها مشکلات زیادی را در محل دفن زباله‌های شهری ایجاد می‌کنند (Viturtia et al., 1989). مقدار MSW تولیدشده در تهران در حدود ۴۰۰۰ tons در روز و شامل بیش از ۷۰ درصد از زباله‌های آلی می‌باشد. هضم بی‌هوازی روش مناسبی برای تجزیه زباله‌های آلی می‌باشد که از آن می‌توان برای تولید انرژی تجدیدپذیر، گاز متان و باقی‌مانده‌های هضم شده استفاده کرد و پس‌ماند آن نیز به‌عنوان کود مایع برای تهویه خاک مناسب می‌باشد (Angelidaki and Ahring, 1994). گزارش‌های متعددی در هضم بی‌هوازی زباله‌های آلی مختلف وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به زباله‌های بازار (Mata-Alvarez et al., 1993)، میوه‌ها و سبزی‌ها (Bouallagui et al., 2005)، زباله‌های خانگی (Krzystek et al., 2001)، زباله‌های آشپزخانه (Rao et al., 2000) و بخش آلی از زباله‌های جامد شهری (Bolzonella et al., 2005) اشاره کرد.

روش هضم بی‌هوازی به روش خشک (AD[3]) یکی از بهترین روش‌های بهبود و بازیافت زباله‌های زیست‌توده است. این روش سبب کاهش حجم زباله و افزایش تولید گاز غنی از انرژی به شکل متان (CH_4) و مواد مغذی حاوی محصولات نهایی می‌شود (Mata-Alvarez et al., 2000). فرآیند AD از قسمت‌های مرطوب (TS[4] ≤ 10%)، نیمه‌خشک (TS 10%-20) و خشک (TS ≥ 20%) تشکیل شده که به غلظت ماده جامد خام (TS) وابسته می‌باشد (Abbassi-Guendouz et al., 2012). در مقایسه با هاضم مرطوب، هاضم خشک، به‌عنوان فرآیندهای بی‌هوازی "جامد-زیاد" شناخته‌شده که برای گرم کردن و پمپاژ نیاز به انرژی کمتری دارد (Luning et al., 2003). طی تحقیقی از رآکتور DAD[5] به‌منظور تولید

---

[1] Municipal solid waste
[2] Anaerobic Digestion
[3] Total solids concentration
[4] Dry anaerobic digestion

گاز متان از زباله‌های زیستی مصنوعی با محتوای DM[1] ۳۰ درصد در ۲ و ۴ رآکتور هوازی استفاده شد، معادلات مدل از نظر تخمیر کلی نشان داد که انتقال جرم به شدت در رآکتور DAD با محتوای DM ۳۰ درصد محدود بود که به دلیل اسیدی شدن محلی سبب کاهش متان تولیدی شد (Abassi-Guendouz et al., 2012).

زباله‌های مواد غذایی (FW[2]) منبع اصلی فساد، بو و شیرابه هستند که دفن مستقیم آنها از سال ۲۰۰۵ در کشور کره ممنوع شده است. در حال حاضر MSW به‌طور جداگانه جمع‌آوری و حمل‌ونقل می‌شود و با امکانات مناسب بازیافت می‌شود که به‌عنوان کود و خوراک دام استفاده می‌شود. با این حال، تقاضا برای این محصولات بسیار پایین است، علاوه بر این در طول فرآیند بازیافت، بسیاری از مواد آلی موجود در FW به‌عنوان پساب ثانویه قابل استفاده می‌باشند (Behera et al.,2011). اتحادیه اروپا به‌منظور کاهش حجم MSW (TS 30 ≥) تا سال ۲۰۱۶ اقدام کرده است. همچنین هدف این اتحادیه تأمین ۲۰ درصد از نیاز کل انرژی مصرفی خود، از این منابع تجدید پذیر تا سال ۲۰۲۰ می‌باشد (Kelleher, 2007).

هضم خشک روش بهتر و قابل‌اجراتری نسبت به هضم تر به‌منظور بهینه کردن FW می‌باشد، چون محتوای TS آن در حدود ۲۰ درصد FW است، در هاضم خشک (AD)، عملیات گرما نسبت به عملیات مزوفیل غالب است، عملیات گرما به‌صورت یک هیدرولیز بالاتر است و همچنین میزان تولید گاز و تخریب پاتوژن‌ها را می‌توان در دمای زیر ۵۰ تا ۶۰ °C به دست آورد (Forster-Carneiro et al., 2008). با این حال، عملیات مزوفیل (۳۰ تا ۴۰ °C) انرژی مورد نیاز کمتر و حساسیت کمتری به شوک بارگذاری مواد دارد (Fernandez Rodriguez et al., 2012). عملکرد و ثبات AD به شدت به گروه‌های میکروبی فعال در فرآیند وابسته می‌باشد؛ بنابراین، شناسایی ساختار جامعه میکروبی حساس به تجزیه‌وتحلیل آن به بهبود بهره‌وری هضم کمک می‌کند (Shin et al., 2010).

مطالعات میکروبی بسیاری در مورد هاضم مرطوب صورت گرفته است، اما تا کنون تحقیقات بسیار کمی در جامعه میکروبی تحت شرایط مزوفیل خشک انجام شده است. هدف از این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاهی آزمایشگاهی به‌منظور انجام فرآیند هاضم خشک و بررسی سینتیک فرآیند تولید بیوگاز با استفاده از دستگاه ساخته شده بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه مورد آزمایش

برای انجام این پژوهش از پسماندهای گوجه‌فرنگی و طالبی که از بازار میوه و تره‌بار همدان (ایران) تهیه شده بود، استفاده شد. دلیل انتخاب طالبی دارا بودن مواد قندی که سبب تسریع در روند تجزیه مواد می‌شود بود و دلیل انتخاب گوجه‌فرنگی نیز دارا بودن مواد معدنی مانند منیزیم درون گوجه‌فرنگی بود که سبب تجزیه سریع‌تر مواد داخل مخزن می‌شوند. نمونه‌ها بلافاصله به آزمایشگاه انتقال داده شدند و رطوبت اولیه و میزان ماده خشک آنها تعیین شد. برای تعیین مقدار رطوبت اولیه، از هر کدام از ضایعات گوجه‌فرنگی و طالبی سه نمونه به وزن ۳۰ gr به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ °C داخل آون قرار داده شدند و محتوای رطوبتی آنها طبق رابطه ۱ برای گوجه‌فرنگی و طالبی به ترتیب ۹۵/۴ و ۹۳/۸۸ درصد بر پایه تر به دست آمد.

$$M_{w.b.} = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، $M_{w.b.}$ محتوای رطوبت بر پایه تر (%w.b.)، W_w وزن مرطوب نمونه (g)، W_d وزن خشک نمونه (g) می‌باشد.

۲-۲- دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایش

یک دستگاه هاضم بی‌هوازی خشک در مقیاس آزمایشگاهی به‌صورت مکعب مستطیل با ابعاد کلی ۰/۶ m ×۰/۲×۰/۲ به‌منظور انجام آزمایش‌ها ساخته شد. به دلیل صرفه‌جویی انرژی برای گرم شدن جدارهای دستگاه تا دمای بهینه ۳۷ °C و قابل مشاهده بودن فعل‌وانفعالات مواد داخل مخزن هاضم، بدنه دستگاه از جنس آکریلیک (پلکسی‌گلس) با ضخامت ۳ mm ساخته شد. شکل ۱ نمای از دستگاه ساخته‌شده و اجزای تشکیل‌دهنده آن را نشان می‌دهد.

[1] Dry matter
[2] food waste

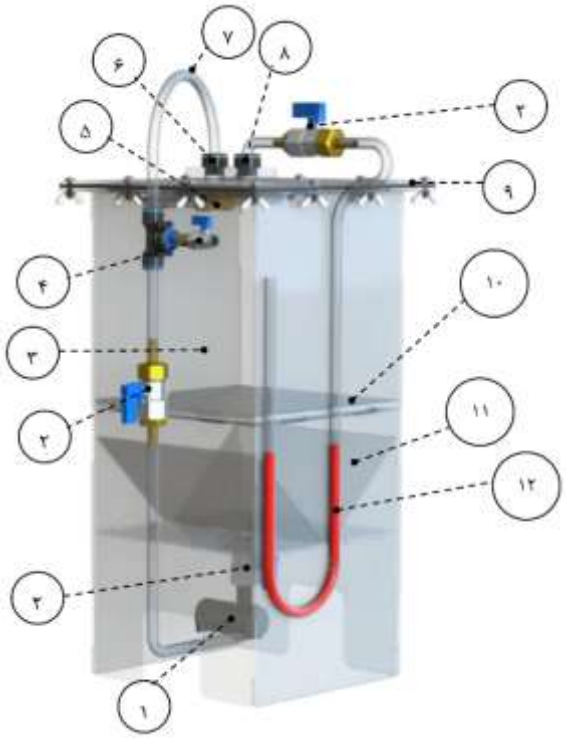

Figure 1. View of dry digester system (1) Pump (2) Hydraulic valve (3) Raw material storage tank (4) Valve for measuring Leachate pH (5) Nozzle (6) Vessel in Leachate (7) Vessel of Leachate (8) Outlet gas (9) Rubber gasket (10) Filter (11) Leachate collected tank (12) U-shaped manometer

شکل ۱- نمای از دستگاه هاضم خشک (۱) پمپ (۲) شیر هیدرولیکی (۳) مخزن نگهداری مواد اولیه (۴) شیر هیدرولیکی برای گرفتن نمونه pH شیرابه (۵) نازل (۶) مجرای ورود شیرابه (۷) مجرای انتقال شیرابه (۸) مجرای خروج گاز (۹) واشر لاستیکی (۱۰) فیلتر (۱۱) مخزن جمع‌آوری شیرابه (۱۲) فشارسنج U شکل

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است این هاضم به دو بخش کلی تقسیم‌بندی شده است. در قسمت بالایی دستگاه مخزن نگهداری مواد و ضایعات به حجم Lit ۸ قرار دارد و قسمت پایین دستگاه به حجم Lit ۲ به‌عنوان مخزن جمع‌آوری شیرابه در اثر فعالیت بی‌هوازی می‌باشد. به‌منظور پمپاژ شیرابه تولیدی روی مواد موجود در مخزن بالایی دستگاه از یک پمپ نوع جریان پیوسته استفاده شد. البته برای تصفیه شیرابه تولید شده ابتدا روی توری (۱۰) مقداری معین از سنگریزه برای تصفیه اولیه شیرابه و سپس توری دیگری علاوه بر توری (۱۰) در ورودی پمپ با مش ریزتر تعبیه شد که هم عملکرد پمپ بالا رود و هم پمپاژ شیرابه به‌راحتی انجام شود. به‌منظور ایجاد شرایط بی‌هوازی، گازبندی و آب‌بندی دستگاه توسط واشر لاستیکی (۹)، پیچ و مهره و چسب سیلیکونی در قسمت درب بالای (قسمت ورود مواد اولیه) و بدنه دستگاه به نحوه مناسب انجام شد. پس از انجام تست‌های آب‌بندی و گازبندی و اطمینان از ایجاد شرایط بی‌هوازی مناسب دستگاه برای بارگذاری آماده شد.

۳-۲- مراحل انجام آزمایش

مواد اولیه بارگذاری شده داخل هاضم خشک شامل ۱ kg گوجه‌فرنگی و ۱/۵ kg طالبی به حجم ۴ L بودند. پس از بارگیری مواد اولیه، دستگاه درون آونی در دمای بهینه ۳۷ °C قرار گرفت. البته تعیین دما با توجه به میانگین دمای هوا در فصل تابستان در منطقه همدان تعیین شد. به‌منظور تأمین دمای ثابت ۳۷ °C از آون استفاده شد. به‌منظور تعیین حجم بیوگاز تولید شده، فشار حاصل از گاز تولیدی با استفاده از فشارسنج U شکل متصل شده به خروجی گاز هر ۸ ساعت اندازه‌گیری شد. گاز تولیدشده از طریق یک شیلنگ پنوماتیکی به قطر ۶ mm که در بالای درب هاضم تعبیه شده بود به یک فشارسنج U شکل هدایت تا حجم بیوگاز تولیدی توسط جابجایی مایع درون مانومتر اندازه‌گیری شود. همچنین برای تعیین pH شیرابه از یک حسگر pH سنج (مدل A023701042) با دیتالاگر مدل (Sartorius) استفاده شد. شیرابه جمع‌آوری شده در مخزن دستگاه هر ۲۴ ساعت با استفاده از ارتعاش کل دستگاه به کمک دست همزده می‌شد، این کار باعث فعال شدن آنزیم‌ها داخل شیرابه و تسهیل و سریع‌تر شدن بیوگاز تولیدی می‌شود. قبل از انجام آزمایش، برخی از خصوصیات اولیه ضایعات با استفاده از روش‌های متداول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند که نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات مواد اولیه استفاده‌شده در هاضم خشک

Table 1. Properties raw materials used in the dry digester

Initial materials	pH	Moisture(%w.b.)	Initial weight (kg)
Tomato	4.65	95.4	1
Cantaloupe	4.55	93.88	1.5

در این پژوهش مقدار گاز تولیدی، pH و رطوبت اولیه مواد بارگذاری شده، اندازه‌گیری شدند. سپس نمودار تولید بیوگاز بر حسب زمان و همچنین نمودار pH بر حسب زمان رسم شدند. همچنین با محاسبه تفاضل گاز متان و pH بین هر دو مقدار متوالی و تقسیم این تفاضل بر فاصله زمانی بین این دو مقدار، آهنگ تولید گاز متان و pH بر حسب زمان تعیین شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بیوگاز تولیدی و خواص آن

یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی عملکرد فرآیند هضم بی‌هوازی خشک در ضایعات کشاورزی می‌باشد. تولید و ترکیب بیوگاز در فرآیند بی‌هوازی در سطوح بارگذاری ۳/۵ kg با ترکیب مشخص و در سطح دمایی ۳۷ °C انجام شد. نمودار تولید بیوگاز طی مدت ۳۳ روز از ضایعات کشاورزی در شکل ۲ نشان داده شده است.

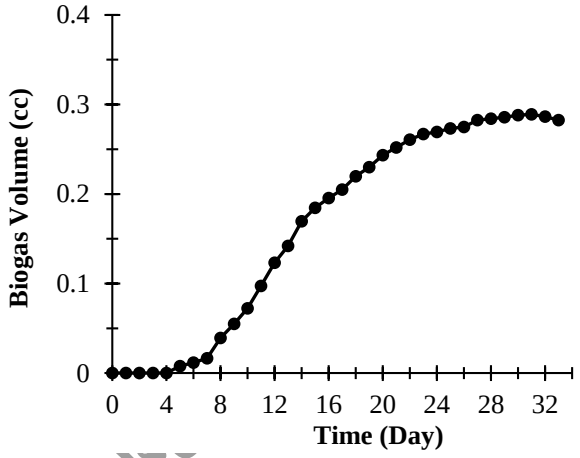

Figure2. Biogas produced during the 33 days

شکل ۲- میزان بیوگاز تولیدی در مدت بارگذاری ۳۳ روز

شکل ۲ روند کلی تولید بیوگاز در دمای ۳۷ °C را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، تولید بیوگاز در ۴ روز اول تقریباً صفر بوده و تولید آن از روز چهارم به بعد روند افزایشی داشت و پس از روز ۲۷ روز تا روز ۳۱ ام به مقدار ثابتی رسیده است و از روز ۳۱ به بعد روند کاهشی داشت که این بیانگر این است که حداکثر تولید گاز تا روز ۲۷ ام بوده است. دلیل این امر را می‌توان ترکیب پیکربنات سدیم (ماده قلیایی) با محیط اسیدی مواد درون رآکتور دانست که حاصل این ترکیب تولید مقدار زیادی گاز CO_2 در روز چهارم به بعد است. اما در روز چهارم pH محیط هاضم روند افزایشی داشت و به سمت محیط بازی گرایش داشت و شرایط مناسبی برای تولید بیوگاز با درصد بالای متان به دست آمد که مقدار بیوگاز تولیدشده ۲۷ روز پس از بارگذاری روند افزایشی داشت و پس از آن به روند تقریباً ثابت رسید و سپس کاهش یافت. شکل ۳ نرخ تولید بیوگاز در بازه صعودی تولید را نشان می‌دهد.

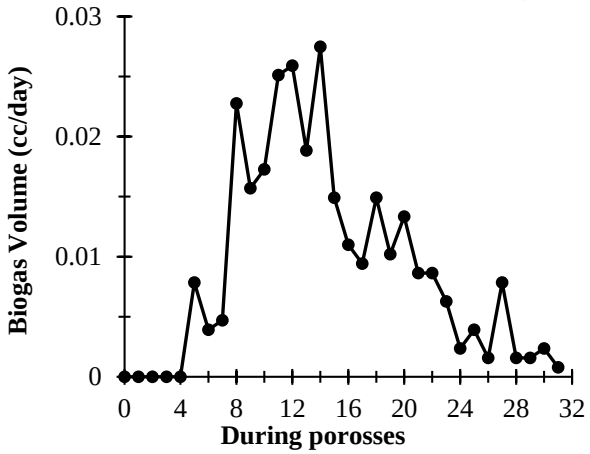

Figure 3. Biogas production rate (cc/day) during the 31 days.

شکل ۳- نرخ تولید بیوگاز (سی سی بر روز) در مدت ۳۱ روز

با توجه به شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که از روز ۴ ام تا روز ۱۵ ام نرخ تولید گاز روند افزایشی و این نرخ از روز ۱۵ ام به بعد روند کاهشی داشت، این بیانگر این نکته است که تولید گاز تا روز ۲۷ ام ادامه داشته ولی سرعت افزایشی تولید گاز تا روز ۱۵ ام بود و از روز ۱۵ ام به بعد سرعت تولید آن روند کاهشی داشت.

اگر مقدار کربن در مخزن هضم ناکافی باشد، میکرواورگانیسم‌ها، قادر به فراهم کردن مواد غذایی مورد نیازشان نیستند. درصورتی‌که مقدار نیتروژن کم باشد، جمعیت میکروبی در حد پایینی باقی می‌ماند که زمان تجزیه مواد آلی را بسیار طولانی می‌کند. نیتروژن بیش از حد لزوم نیز به‌صورت گاز آمونیاک از سیستم خارج می‌شود، بنابراین برای دسترسی به میزان مناسب مواد غذایی و مواد لازم برای ساخت‌وساز سلولی باید این دو ماده با نسبت‌های مناسب باهم ترکیب شوند. مقدار کربن به نیتروژن مناسب برای هضم به‌وسیله باکتری بی‌هوازی با توجه به نوع مواد اولیه بایستی در محدوده ۱۵ تا ۳۰ باشد (Saedi et al., 2013). در بسیاری از پژوهش‌ها مشاهده شد که مصرف کربن (به‌منزله ماده غذایی میکرواورگانیزم متان‌زا) ۲۵ تا ۳۵ برابر سریع‌تر از مصرف نیتروژن (ماده مورد نیاز برای سوخت‌وساز سلولی) است (Yadvika et al., 2004). البته لازم به ذکر است که مطالعات و پژوهش‌ها برای تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی به روش هاضم خشک بسیار اندک می‌باشد و پژوهش حاضر گامی مثبت برای این روش و جلوگیری از هدر رفت انرژی می‌باشد.

۲-۳- تغییرات pH در طول دوره تولید بیوگاز

یک از مهم‌ترین عوامل در تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی روند تغییرات pH می‌باشد. شکل (۴) روند تغییرات pH در تولید بیوگاز به روش هاضم خشک طی مدت ۳۳ روز از انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

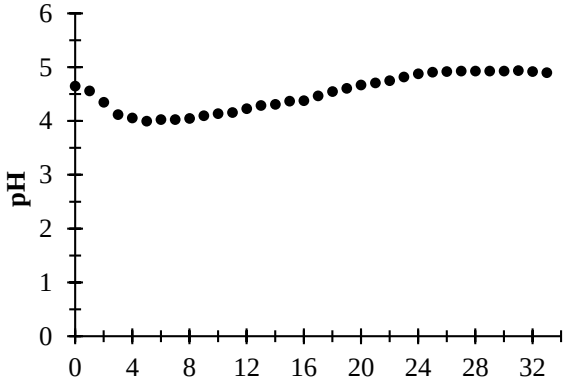

Figure 4. PH changes in the digestion process produces biogas dry during the 33 days

شکل ۴- روند تغییرات pH در تولید بیوگاز به روش هاضم خشک در مدت ۳۳ روز

با توجه به شکل (۴) در ابتدای بارگذاری در سطح دمای ۳۷ °C، از روز اول تا روز ۴ ام، pH روند کاهشی ولی از روز ۴ ام به بعد روند افزایشی

داشت تا به مقدار ثابت ۵/۵ رسید که راندمان هضم را نیز تحت تأثیر خود قرار داده است و به‌مرور زمان‌بر پایداری رآکتور افزوده شده است. سیستم‌های بی‌هوازی از لحاظ عملکردی به شدت تابع pH و دمای مناسب می‌باشند. pH در فرآیند متان سازی اهمیت ویژه‌ای دارد به‌گونه‌ای که در pH اسیدی و بسیار قلیایی میزان تولید بیوگاز به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد (Forste et al., 2008). باکتری‌های اسیدساز با تولید اسیدهای آلی سبب کاهش pH سیستم می‌شوند. در دمای پایین حلالیت CO_2 بیشتر بوده و به دنبال آن pH کمتر می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرآیند تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی گوجه‌فرنگی و طالبی در سطح دمایی ۳۷ $^{\circ}C$ موردمطالعه قرار گرفت. دستگاه هاضم خشک طراحی‌شده برای تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی با توجه به آزمایش انجام‌شده دستگاه مناسبی بود و از این روش می‌توان برای تولید بیوگاز با صرفه‌جویی انرژی و استفاده درست از ضایعات کشاورزی استفاده کرد. نتایج نشان داد که سطح دمایی ۳۷ $^{\circ}C$، روند نرخ و میزان تولید بیوگاز مناسبی داشت. بیش‌ترین تولید تجمعی بیوگاز به میزان ۰/۳ cc در روز رسید. تولید گاز تا روز ۴ ام صفر و از روز ۴ ام تا ۲۷ ام افزایش یافت. pH گاز تا روز ۴ ام روند کاهشی و از روز ۴ تا ۳۱ ام به میزان ۵/۵ رسید و روند افزایشی داشت. نرخ تولید گاز تا روز ۱۵ ام روند افزایشی ولی از روز ۱۵ ام به بعد روند کاهشی داشت.

۵- مراجع

Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., & Escudie, R. (2012). Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. Bioresource Technology. 111, 55-61.

Al-Masri, M. R. (2001). Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes. Bioresource Technology. 77(1), 97-100.

Alvarez, R., & Liden, G. (2008). Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. Renewable Energy. 33(4), 726-734.

Angelidaki, I., & Ahring, B. (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. Water Research. 28, 727-731.

Behera, S. K., Kim, D. H., Shin, H. S., Cho, S.K., Yoon, S.P., & Park, H. S. (2011). Enhanced methane recovery by food waste leachate injection into a landfill in Korea. Waste Manage. 31, 2126-2132.

Bolzonella, D., Pavan, P., Fatone, F., & Cecchi, F. (2005). Anaerobic fermentation of organic municipal solid wastes for the production of soluble organic compounds. Industrial and Engineering Chemistry Research 44(10), 3412-3418.

Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., & Hamdia, M. (2005). Review bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. Process Biochemistry. 40, 989-995.

El-Shinnawi, M. M., El-Tahawi, B. S., El-Houssieni, M., & Fahmy, S. S. (1989). Changes of organic constituents of crop residues and poultry wastes during fermentation for biogas production. MIRCEN Journals of Applied Microbiology and Biotechnology. 5(4), 475-486.

Fernandez Rodriguez, J., Perez, M., & Romero, L. I. (2012). Mesophilic anaerobic digestion of the fraction of municipal solid waste: optimisation of the semicontinuous process. Chemical Engineering Journal. 193, 10-15.

Forster-Carneiro T., Perez, M., & Romero, L. I. (2008). Anaerobic digestion of municipal solid wastes: Dry thermophilic performance. Bioresource Technology. 99, 8180-8184.

He, Y., Yunzhi, P., Yanping, L., Xiujin, L., & Kuisheng, W. (2008). Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production. Energy and Fuels. 22, 2775–2781.

Hilkiah Igoni, A., Ayotamuno, M. J., Eze, C. L., Ogaji, S. O. T., & Probert, S. D. (2008). Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. Applied Energy. 85, 430-438.

Hills, D. J., & Roberts, D. W. (1981). Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues. Agricultural Wastes. 3(3), 179-189.

Kelleher, M. (2007). Anaerobic digestion outlook for MSW streams. Biocycle. 48(8), 51-55.

Krzystek, L., Ledakowicz, S., Kahle, H. J., & Kaczorek, K. (2001). Degradation of household biowaste in reactors. Journal of Biotechnology. 93, 103-112.

Luning, L., Van Zundert, E. H. M., & Brinkmann, A. J. K. (2003). Comparison of dry and wet digestion for solid waste. Water Science and Technology. 48(4), 15–20.

Mata-Alvarez, J., Mtz-Viturtia, A., Llabres-Luengo, P., & Cecchi, F. (1993). Kinetic and performance study of a batch two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. Biomass and Bioenergy. 5 (6), 481-488.

Mata-Alvarez, J., Mace, S., & Llabres, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource Technology. 74(1), 3-16.

Moorhead, K. K., & Nordstedt, R. A. (1993). Batch anaerobic digestion of water hyacinth: effects of particle size, plant nitrogen content and inoculum volume. Bioresource Technology. 44(1), 71-76.

Rafique, R., Poulsen, T. G., Nizami, A. S., Asam, Z. Z., Murphy, J. D., & Kiely, G. (2010). Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. Energy. 35(12), 4556-4561.

Raininko, K., Heikkilae, T., Lampila, M., & Kossila, V. (1981). Effect of chemical and physical treatment on the composition and digestibility of barley straw. Agriculture and Environment. 6, 261-266.

Rao, M. S., Singh, S. P., Singh, A. K., & Sodha, M. S. (2000). Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW: assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage. Applied Energy. 66, 75-87.

Saedi, S., Hashemi, S. J., & Hashemi, S. Y. (2013). Effect of chemical pretreatment of rice straw with ammonia, urea, and interest in biogas production. Iranian Journal of Biosystem Engineering. 44(1), 65-75. (In Farsi).

Sanchez, E. P., Weiland, P., & Travieso, L. (1992). Effect of the hydraulic retention time on the anaerobic biofilm reactor efficiency applied to screened cattle waste treatment. Biotechnology Letters. 14(7), 635-638.

Satyanarayan, S., Paresh, M., & Ramakant. (2008). Biogas production enhancement by Brassica compestries amendment in cattle dung digesters. Biomass and Bioenergy. 32(3), 210-215.

Sharam, D. K. (2002). Studies on availability and utilization of onion storage waste in a rural habitat. Ph. D. dissertation, Indian Institute of Technology, Delhi.

Shi, J., Shivappa, R. R. S., & Chinn, M. S. (2009). Microbial pretreatment of cotton stalks by submerged cultivation of phanerochaete chrysosporium. Bioresource Technology. 100, 4388- 4395.

Shin, S. G., Han, G. S., Lim, J. T., Lee, C. S., & Hwang, S. H. (2010). A comprehensive microbial insight into two-stage anaerobic digestion of food waste-recycling wastewater. Water Research. 44, 4838-4849.

Singh. A., Singh, N., & Bishnoi, N. R. (2010). Enzymatic hydrolysis of chemically pretreated rice straw by two indigenous fungal strains: a comparative study. Journal of scientific and Industrial Research. 69, 232-237.

Taherzadeh. M. J., & Karimi, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulose Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. International Journal of Molecular Sciences. 9, 1621-1651.

Viturtia, A., Mata-Alvarez, J. Cecchi, F., & Fazzini, G. (1989). Two-phase anaerobic digestion of a mixture of fruit and vegetable wastes, Biological Wastes. 29, 189-199.

Yadvika, S., Sreekrishnan, T. R. Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solids substrates using diff erent techniques–a review. Bioresource Technology. 95, 1-10.

Zhang, R., & Zhang, Z. (1999). Biogasification of rice straw with an anaerobic phased solids digester system. Bioresource Technology. 68, 235-245.

Zhong, W., Zhang, Z., Qiao W. Fu P., & Liu, M. (2011). Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion. Renewable Energy. 36: 1875-1879.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران