افزایش میزان تولید بیوگاز از ضایعات میوه: استفاده از پیش تیمارهای شیمیایی، مکانیکی و حرارتی و هضم ترکیبی با فضولات دامی

سامان فیاضی[۱]، سمیرا زارعی[۱،*]، هادی صمیمی اخیجهانی[۱]، محمدرضا ملکی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
*. مسئول مکاتبه: سمیرا زارعی Email: s.zareei@uok.ac.ir

چکیده

سالانه بخش قابل توجهی از محصولات میوه و تره‌بار به دلیل نامناسب بودن سیستم حمل و نقل و امکانات ذخیره‌سازی در کشور تلف می‌شود. ضایعات محصولات توت‌فرنگی و سیب در ایران به ترتیب ۴۰٪ و ۳۱٪ تخمین زده می‌شود که می‌تواند به عنوان منبع زیست‌توده در تولید بیوانرژی در نظر گرفته شود. ضایعات میوه با وجود پتانسیل مناسب در تولید بیوگاز، به دلیل داشتن مواد لیگنوسلولزی برای کاهش زمان تجزیه بیولوژیکی به پیش تیمار نیاز دارند. در این پژوهش تأثیر پیش تیمارهای مکانیکی، شیمیایی و حرارتی بر تجزیه پذیری ضایعات میوه و میزان تولید بیوگاز از هضم ترکیبی آن با فضولات دامی بررسی شد. پیش تیمار مکانیکی با خرد کردن ضایعات سیب و توت فرنگی به قطعات ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر، پیش تیمار شیمیایی با قرار دادن ضایعات میوه در محلول هیدروکسیدسدیم (NaOH) به غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ درصد به مدت ۳ ساعت و تیمار حرارتی با قرار دادن ضایعات به همراه آب مقطر در داخل مایکروویو در توان ۸۰۰ وات به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه انجام شدند. ضایعات پیش‌فرآوری شده با فضولات دامی ترکیب شده و در شرایط هضم بی‌هوازی به مدت ۲۵ روز داخل هاضم‌های ناپیوسته تغذیه شدند. نتایج نشان داد که پیش تیمارهای‌های خرد کردن، هیدروکسید سدیم و مایکروویو میزان تولید بیوگاز را نسبت به حالت بدون پیش‌تیمار به ترتیب ۵٪، ۵۰/۹٪ و ۲۷/۳٪ افزایش دادند. روش پیش‌فرآوری شیمیایی با هیدروکسید سدیم بیشترین تأثیر را بر میزان بیوگاز تولیدی داشت و می‌تواند به عنوان روشی مطلوب برای پیش‌فرآوری ضایعات مذکور پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: توت فرنگی، خرد کردن، مایکروویو، هضم بی‌هوازی، هیدروکسید سدیم.

How to cite:

S Fayazi, S Zareei, H Samimi-Akhijahani, M R Maleki. 2024. Improving biogas production from fruit waste: using chemical, mechanical and thermal pretreatments and co-digestion with cow manure.of agricultural mechanization in Neyriz region. *Journal of Agricultural Mechanization* 9 (1):13-23.

Improving biogas production from fruit waste: using chemical, mechanical and thermal pretreatments and co-digestion with cow manure

Saman Fayazi[1], Samira Zareei[1,*], Hadi Samimi-Akhijahani[1], Mohammad Reza Maleki[1]

Received:January 1, 2024 Accepted: April 16, 2024

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

*. Corresponding Author: s.zareei@uok.ac.ir

Abstract

Every year, a significant part of fruit and vegetable products is lost due to inappropriate transportation systems and storage facilities. The waste of strawberry and apple products in Iran is estimated at 40% and 31%, respectively; which can be considered as a source of biomass in bioenergy production. Despite the good biogas production potential, fruit waste requires pretreatment due to lignocellulosic matter to reduce biological decomposition time. This research investigated the effect of mechanical, chemical and thermal pretreatments on the degradability of fruit waste and the amount of biogas production from its co-digestion with cow manure. Mechanical pretreatment was by crushing apple and strawberry waste into pieces of 5, 10 and 15 mm, chemical pretreatment was by placing fruit waste in sodium hydroxide solution (NaOH) at concentrations of 6, 8 and 10% for 3 hours and heat treatment was done by putting waste together with distilled water inside the microwave at 800 watts for 10, 20 and 30 minutes. The pretreated wastes were co-digested with cow manure and were fed into the batch digesters under anaerobic digestion conditions for 25 days. The results showed that the pretreatments of crushing, sodium hydroxide and the microwave increased biogas production compared to the control by 5%, 50.9% and 27.3%, respectively. Chemical pretreatment can be suggested as a preferred method of pretreatment of the identified wastes.

Keywords: Anaerobic digestion, Crushing, Microwave, Sodium hydroxide, Strawberry.

۱- مقدمه

محدودیت منابع انرژی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، توجه کشورهای مختلف جهان را به منابع تجدید-پذیر معطوف کرده است (Kasinath et al., 2021). در حال حاضر مسئله‌ی تأمین انرژی، یکی از چالش‌های اساسی تمامی کشورهای جهان به‌خصوص کشورهای در حال توسعه می‌باشد (Afazeli et al., 2014). سوخت‌رسانی به روستاهای دور افتاده حتی در کشوری مانند ایران که منابع غنی انرژی را در اختیار دارد، بسیار مشکل و هزینه‌بر است. یک راه حل برای مشکل مذکور، استفاده از انرژی‌های تجدید-پذیر و محلی است. بیوگاز یکی از انواع این انرژی‌هاست که علاوه بر تولید انرژی، مزایایی همچون تولید کودهای غنی کشاورزی، افزایش سطح بهداشت عمومی جامعه،کنترل بیماری‌ها و دفع مواد زائد از جوامع انسانی را به همراه دارد. بیوگاز، گازی است که بر اثرهضم بی‌هوازی مواد آلی و بیولوژیک به وسیله میکروارگانیسم‌های زنده تولید می‌شود و معمولاً حاوی ۵۵ تا ۷۰ درصد متان، ۳۰ تا ۴۵ درصد دی‌اکسیدکربن و نیز مقادیر اندکی نیتروژن، هیدروژن و سولفید هیدروژن می‌باشد.

در دسترس بودن و ارزان بودن منابع و مواد اولیه تولید بیوگاز و نیز قابلیت تیمار مواد زائد خطرناک در فرایند هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز، این فرایند را به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار داده است (Noorollahi et al., 2015). یکی از منابع مهم برای تولید بیوگاز، ضایعات میوه است که برای آن محل مصرف مناسبی در نظر گرفته نشده است و در صورت مدیریت و تجزیه پذیری مناسب، می‌توان از این حجم وسیع پسماند، میزان قابل توجهی انرژی و کود ارگانیک تولید کرد.ایران دارای رتبه اول تولید میوه در خاورمیانه و شمال آفریقا است. اما به دلایل مختلف به طور متوسط حدود ۳۰ درصد از محصولات باغی در مراحل مختلف تولید تا زمان مصرف از بین می‌رود. به طوری که این میزان ضایعات بیش از واردات سالانه محصولات کشاورزی است. ناکارآمدی ماشین آلات و تجهیزات حمل و نقل، استفاده از تجهیزات نامناسب برای عملیات برداشت، فرآوری و ذخیره‌سازی و نبود بسته بندی تخصصی میوه و سبزی میزان ضایعات باغی را چندین برابر کرده است. در ایران سالانه حدود ۲ میلیون تن میوه و تره

بار به دلیل نامناسب بودن سیستم حمل و نقل و امکانات ذخیره‌سازی از بین می‌رود. ضایعات سیب و مرکبات به تنهایی ۵۵۰ تا ۵۸۰ هزار تن (حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد کل ضایعات میوه) را تشکیل می‌دهند. بر اساس اطلاعات موجود، میزان ضایعات حمل و نقل و

نگهداری توت فرنگی و سیب در ایران به ترتیب ۴۰ درصد و ۳۱ درصد برآورد شده است و با توجه به حجم بالای ضایعات، این دو محصول برای مطالعه انتخاب شدند (Chagali & Abbasi, 2017).

ضایعات میوه که شامل مواد لیگنوسلولزی هستند باید قبل از ورود به فرایند هضم بی‌هوازی پیش‌فرآوری شوند تا استحکام بافت آن‌ها کاهش یابد و لیگنین موجود در آن‌ها از سلولز و همی‌سلولز جدا شود. پیش تیمار با افزایش سطح، تعامل موثر میکروب‌ها یا آنزیم‌ها را امکان پذیر می‌کند و با کاهش کریستالینیت سلولز، فرایند هضم را در شرایط بی هوازی بهبود می‌بخشد. محققان روش‌های پیش‌فرآوری متنوعی شامل روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی شیمیایی و بیولوژیکی را برای بهبود تجزیه پذیری مواد لیگنوسلولزی معرفی و پیشنهاد کرده اند. اهداف پیش‌فرآوری مطلوب عبارت‌اند از: در دسترس قرار دادن آسان فیبر سلولزی برای حمله‌ی باکتری‌ها و آنزیم‌ها، رساندن میزان انرژی مصرفی به حداقل، محافظت و جلوگیری از تخریب سلولز و همی‌سلولز، کاهش هزینه‌ی ساخت راکتور، جلوگیری از تجمع و تشکیل بازدارنده‌های هیدرولیز آنزیمی و تخمیر، تولید پسماند کم و مصرف مواد شیمیایی ارزان (Taherzadeh & Karimi, 2008; Patinvoh et al., 2017; Yu et al., 2019; Abraham et al., 2020).

خرد کردن و آسیاب کردن متداول‌ترین پیش تیمار مکانیکی برای مواد لیگنوسلولزی هستند. روش خردکردن با کاهش اندازه ذرات می‌تواند مساحت قابل دسترس و اندازه حفره‌ها را افزایش و نیز درجه پلیمریزاسیون سلولز و میزان تبلور را کاهش دهد که در نهایت منجر به بهبود فرایند هیدرولیز و تجزیه‌پذیری مواد لیگنوسلولزی شود. طالعاتی در زمینه بررسی تأثیر این روش‌ها بر هضم پذیری مواد لیگنوسلولزی انجام شده است که برخی از آنها عبارتند از: تأثیر پیش تیمار آسیاب کردن کاه برنج بر میزان تولید متان (Zhang and Zhang, 1999)، تأثیر پیش تیمار خرد کردن شش ماده لیگنوسلولزی مختلف بر میزان تولید متان (Dahunsi, 2019)، تأثیر خرد کردن کاه گندم بر میزان تولید بیوگاز (Zehra, 2013)، تأثیر آسیاب کردن فضولات دامی بر تولید متان (Emiliano et al., 2010)، تأثیر خرد کردن یونجه بر میزان تولید متان (Hermann et al., 2012)، پیش تیمار مکانیکی کاه گندم، کاه جو و ساقه ذرت و تأثیر آن بر تولید متان (Menardo et al., 2012).

فرایند در پیش تیمار شیمیایی تخریب ساختار مواد لیگنوسلولزی با واکنش شیمیایی انجام می‌شود. در این روش می‌توان از برخی محلول‌های اسیدی، قلیایی، اکسیداتیو و حلال-آلی استفاده کرد. در پیش تیمار قلیایی، معمولاً از عواملی مانند هیدروکسید سدیم و آمونیاک استفاده می‌شود .این تیمارها عمدتاً با حذف لیگنین یا همی‌سلولز موجود در زیست توده عمل می‌کنند (Taherzadeh & Karimi, 2008). طبق مطالعات انجام شده استفاده هیدروکسید سدیم رقیق باعث افزایش سطح داخلی، کاهش مناطق بلورینه، متورم شدن ساختار، کاهش درجه پلیمریزاسیون، تخریب ساختار لیگنین و همچنین باز و جدا کردن اتصالات ساختاری بین کربوهیدرات‌ها و لیگنین می‌شود (Zhao et al., 2008). بررسی تأثیر پیش تیمار شیمیایی بر فرایند هضم بی هوازی موضوع مطالعات زیادی بوده است که برخی از آن‌ها عبارتند از: اثر ترکیب روش بخار به همراه پیش تیمار شیمیایی افزودن هیدروکسید سدیم به فضولات دامی بر میزان تولید متان (Emiliano et al., 2010)، تأثیر پیش تیمار هیدروکسیدسدیم بر قابلیت هضم و میزان تولید بیوگاز از کاه گندم (Chandra et al., 2012)، اثر پیش تیمار آمونیاک کاه گندم بر تولید متان (Li et al., 2015; Yang et al., 2015)، اثر پیش تیمار شیمیایی افزودن NaOH و CaO به پسماند ذرت بر میزان تولید بیوگاز (You et al., 2019)، اثر پیش تیمار اسید سولفوریک بر تولید متان از کاه کلزا (Gaballah et al., 2020).

در طی فرایند تابش امواج مایکروویو، انحراف در جهت دوقطبی ترکیبات قطبی حلالیت زیست توده لیگنوسلولزی را افزایش می‌دهد (Pellera & Gidarakos, 2016; Feng et al., 2018). در روش مایکروویو، پسماند به‌صورت مستقیم حرارت‌دهی نمی‌شود بلکه در یک محیط آبی قرار داده می‌شود این کار باعث افزایش حرارت داخلی در پسماند (ناشی از لرزش‌های پیوند قطبی در آن) می‌شود که منجر به متلاشی شدن بافت لینگوسلولزی می‌شود. در پیش تیمار حرارتی مایکروویو، زمان فرایند به دلیل گرم کردن سریع ماده لیگنوسلولزی با حداقل گرادیان حرارتی، کوتاه است. کاربرد یک پیش تصفیه مایکروویو برای تولید متان توسط بسیاری از گروه های تحقیقاتی از جمله Eskicioglu et al. (2007)و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. قرار دادن کاه خرد شده گندم تحت تابش مایکروویو و بررسی تأثیر این پیش تیمار بر میزان تولید بیوگاز (Zehra, 2013)، بهینه سازی پیش تیمار مایکروویو برای افزایش میزان تجزیه پذیری کاه گندم و میزان تولید متان (Jackowiak et al., 2011)، پیش تیمار حرارتی کاه گندم، کاه جو و ساقه ذرت و تأثیر آن بر تولید متان (Menardo et al., 2012)، پیش تیمار ترکیبی شیمیایی و مایکروویو بر کاه برنج و تأثیر آن بر عملکرد تولید بیوگاز (Kaur & Phutela, 2016; Qian et al., 2019; Naik et al., 2021)، پیش تیمار ترکیبی شیمیایی و مایکروویو بر ضایعات صنعتی تولید آبمیوه (Gulsen Akbay et al., 2021) و پیش تیمار ترکیبی مایکروویو، اسیدی و قلیایی بر ضایعات مخلوط گل برای تولید بیوگاز (Agarwal et al., 2021) تعدادی از مطالعات در این زمینه هستند.

فضولات دامی از دیگر منابع مهم مورد استفاده در تولید بیوگاز است. طبق بررسی‌های به عمل آمده، مقدار فضولات دامی قابل جمع-آوری در ایران ۱۸/۹ میلیون تن در سال می‌باشد که بخش اعظم آن برای پوسیده شدن و استفاده به عنوان کود در فضای آزاد رها می‌شود. تجمع فضولات دامی در محیط دامداری برای مدت طولانی، باعث ایجاد بوی نامطبوع و ازدیاد حشرات و انتقال آلودگی‌های مختلف به

دام و محل‌های مسکونی می‌شود. در حالی‌که با استفاده از هضم بی‌هوازی این مقدار فضولات، علاوه بر ایجاد محیط سالم برای دام و انسان و تولید کود با کیفیت و بهداشتی، می‌توان ۲۲۶۰ میلیون مترمکعب بیوگاز تولید کرد (Zareei, 2018). نسبت کربن به نیتروژن در پسماند-های گیاهی بالاست و در مقابل، در فضولات دامی این نسبت پایین است. لذا ترکیب آن‌ها می‌تواند مقدار بهینه‌ای از نسبت کربن به نیتروژن را فراهم نماید (Zhang et al., 2016; Hagos et al., 2017; Zareei & Khodaei, 2017).

در این تحقیق به بررسی تولید بیوگاز در یک فرایند هضم ترکیبی از ضایعات میوه و فضولات دامی پرداخته می‌شود و روش‌های پیش‌فرآوری مکانیکی، حرارتی و شیمیایی ضایعات از نظر تأثیر بر میزان تولید بیوگاز مقایسه می‌شوند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه مواد اولیه برای خوراک هاضم

۲-۱-۱- ضایعات سیب

در سال 2019 ایران با 2600 هزار تن، مقام ششم تولید سیب در جهان را به خود اختصاص داده است (Anonymous, 2020). در طی فرآوری سیب به‌صورت کمپوت و آب میوه، تفاله آن به عنوان محصول جانبی باقی می‌ماند. تفاله سیب یک فرآورده جانبی با ارزش است که حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد وزن سیب را تشکیل می‌دهد. در کشور ایران علی‌رغم تولید حدود ۳۰۰ هزار تن تفاله سیب در سال، هیچ‌گونه برنامه‌ریزی اصولی در مورد این ماده با ارزش انجام نشده است. ضایعات سیب برای انجام آزمایش‌ها، از شهرستان سنندج تهیه شد.

۲-۱-۲- ضایعات توت فرنگی

طبق آمار Anonymous (2020) ایران در سال ۲۰۱۹ حدود ۶۰ هزار تن توت فرنگی تولید کرده است که استان کردستان با بیش از ۶۵ درصد تولید در رتبه نخست در کشور قرار دارد. توت فرنگی گیاهی چند ساله است که بعد از چند سال بهره‌وری آن پایین می‌آید و باید دوباره از اول کشت شود و به دلیل نگهداری و جابجایی سخت آن امکان له شدن خود محصول نیز وجود دارد. درنتیجه به دلیل سطح زیر کشت زیاد این محصول در کشور، پتانسیل تولید بیوگاز و کود زیستی از طریق هضم بی‌هوازی را دارا است. ضایعات توت فرنگی برای انجام آزمایش‌ها، از روستاهای استان کردستان تهیه شد.

۲-۱-۳- فضولات دامی

برای انجام این پژوهش کود گاوی از گاوداری مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان واقع در روستای دوشان تهیه شد. نمونه‌های کود گاوی به‌صورت تصادفی جمع‌آوری شده و لازم به ذکر است گاوها از یونجه و ذرت علوفه‌ای تغذیه می‌نمودند. نمونه‌ها بدون اتلاف وقت به آزمایشگاه انتقال داده شدند.

رطوبت نمونه‌ها و کل ماده جامد با قرار دادن نمونه‌ها در کوره به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد و سپس قرار دادن وزن های به دست آمده در روابط مربوطه اندازه‌گیری شد. برای اندازه-گیری درصد خاکستر، کربن و کل مواد فرار، نمونه های خشک شده در آون یک بار دیگر در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس وزن نمونه های خاکستر در روابط مربوطه جاگذاری شد. برای اندازه گیری نیتروژن از روش کجلدال استفاده شد. سه مرحله کامل برای اندازه گیری نیتروژن در این روش وجود دارد که شامل هضم، تقطیر و تیتراسیون می‌باشد. مشخصات نمونه های ضایعات در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های ضایعات توت‌فرنگی و سیب و فضولات گاوی

Table 1. Characteristics of strawberry, apple and cow manure samples

نمونه Substrates	نسبت کربن به نیتروژن carbon to nitrogen ratio	درصد نیتروژن nitrogen (%)	کل ماده فرار total volatile matter (%)	درصد کربن carbon (%)	درصد خاکستر ash (%)	کل ماده جامد total solid matter (%)	درصد رطوبت Moisture (%)
توت‌فرنگی Strawberry	33.16	1.62	83.02	53.73	3.28	8.95	91.04
سیب Apple	11.41	4.79	79.04	54.31	2.23	14.81	85.18
فضولات گاوی Cow manure	15.17	3.01	76.3	45.67	17.78	18.42	81.57

۲-۲- پیش تیمارها

۲-۲-۱- پیش تیمار خرد کردن

اولین روش پیش‌فرآوری، خرد کردن بود. اندازه خردکردن برای ضایعات میوه به اندازه‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر تعریف شد. به‌صورتی که ضایعات در سه هاضم اول با اندازه ۵ میلی متر، سه هاضم دوم ۱۰ میلی متر و سه هاضم سومی ۱۵ میلی متر تغذیه شدند.

۲-۲-۲- پیش تیمار شیمیایی

در این روش هر کدام از نمونه‌ها داخل ظرف پلاستیکی ریخته شد سپس هیدروکسید سدیم با غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ درصد اضافه شد و در دمای اتاق به مدت ۳ ساعت قرار گرفت (Naik et al., 2021; Talha et al., 2018). پس از گذشت زمان مذکور، ضایعات میوه با استفاده از آب مقطر شستشو داده شدند تا اسیدیته آن به ۷ رسید و سپس

هرکدام از خوراک‌ها به داخل هاضم از قبل تعریف شده انتقال داده شدند.

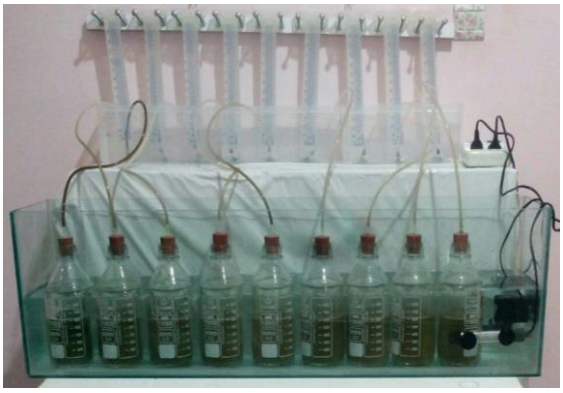
۳-۲-۲- پیش تیمار با مایکروویو

از آنجا که برای پیش‌فرآوری مایکروویو ضایعات باید در محیط آبی قرار گرفته و در معرض تابش مایکروویو قرار گیرند، در این آزمایش‌ها از ظرف پیرکس و آب مقطر برای ایجاد شرایط مناسب قرارگیری ضایعات در مایکروویو استفاده شد. برای سه هاضم اول ضایعات میوه به همراه ۶۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۱۰ دقیقه در توان ۸۰۰ وات درون مایکروویو گذاشته شد. برای سه هاضم دوم ضایعات میوه به همراه ۷۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۲۰ دقیقه در توان ۸۰۰ وات و برای سه هاضم آخر ضایعات میوه به همراه ۹۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه در توان ۸۰۰ وات در داخل مایکروویو قرار داده شد (Qian et al., 2019). در هر سه مورد پس از پایان زمان، و دمای نمونه‌ها به ۸۵ درجه سلسیوس رسید. در نهایت پس از پیش‌فرآوری، خوراک به داخل هاضم‌ها ریخته شد.

۳-۲- هضم بی هوازی

در این مطالعه از ۹ هاضم شیشه‌ای ناپیوسته از جنس پیرکس به حجم یک لیتر استفاده شده است. میزان حجم کاری هر هاضم ۷۰۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شد و ۳۰۰ میلی‌لیتر باقی مانده نیز برای ذخیره گاز تولیدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). کل مواد خوراک در این روش (ناپیوسته) داخل هاضم‌ها ریخته می‌شوند و تا پایان آزمایش درون هاضم باقی می‌مانند. از حمام آب گرم برای ثابت و یکنواخت نگه‌داشتن دمای داخل هاضم‌ها در محدوده دمایی مزوفیلیک (۳۵-۳۷ درجه سلسیوس) استفاده شد. اندازه‌گیری میزان بیوگاز تولید شده، به صورت روزانه از طریق روش جابجایی آب که روشی متداول محسوب می‌شود، انجام شد.

حجم خوراک شامل ۵۰۰ میلی لیتر آب و ۲۰۰ میلی لیتر ضایعات شامل ۱۲۰ گرم فضولات گاوی و ۸۰ گرم ضایعات مخلوط سیب و توت فرنگی بود. هر آزمایش در سه تکرار انجام شد. به منظور ایجاد محیطی همگن و جلوگیری از ته‌نشین شدن مواد در هاضم‌ها و همچنین ایجاد یکنواختی در مخلوط، هم‌زدن با تکان دادن ملایم هاضم‌ها با دست دو بار در طول روز و همزمان با خواندن و ثبت داده‌ها انجام شد.



شکل ۱- هاضم‌های ناپیوسته مورد استفاده در آزمایش‌های تولید بیوگاز

Fig 1. Batch digesters used in biogas production experiments

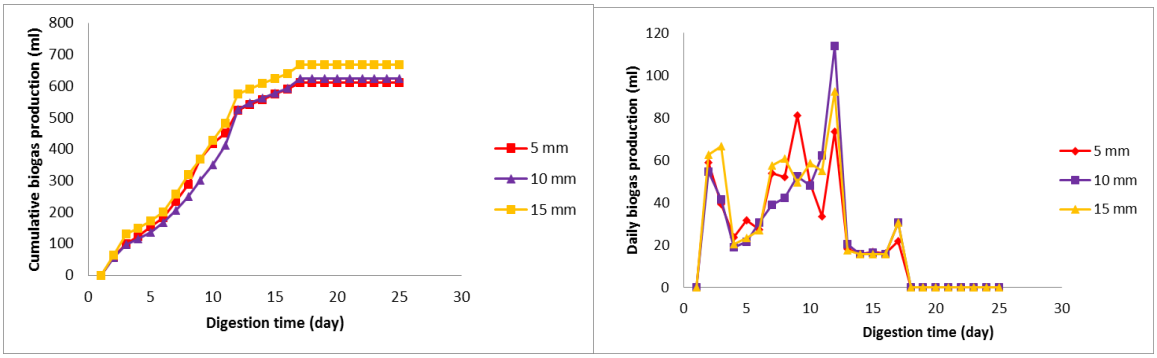
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر پیش‌فرآوری خرد کردن بر میزان تولید بیوگاز

شکل (۲a) میانگین تولید روزانه بیوگاز را برای سه دسته اندازه قطعات ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر در روش پیش‌فرآوری مکانیکی خرد کردن نشان می‌دهد. روند میانگین تولید روزانه بیوگاز برای اندازه ۵ میلی متری قطعات ضایعات نشان می‌دهد از روز اول تا روز دوم ۶۰ میلی‌لیتر گاز تولید شد و پس از آن تا روز چهارم روند کاهشی پیدا کرد. کاهش تولید گاز به دلیل اسیدی شدن محیط و فاز اسیدزایی در فرایند هضم، رخ می‌دهد. با افزودن کربنات کلسیم به محیط اسیدی، بار دیگر روند تولید گاز به‌صورت افزایشی و همراه با نوسانات بود. در روز نهم تولید گاز به حداکثر مقدار خود رسید و بار دیگر تا روز یازدهم افت کرد و سپس به مدت یک روز روند صعودی گرفت پس ازآن فقط در روز هفدهم به میزان ناچیزی گاز تولید شد و تا انتهای فرایند دیگر گازی تولید نشد و از روز هفدهم به بعد افزودن کربنات کلسیم هم تأثیری بر روی آن نداشت.

روند میانگین تولید روزانه بیوگاز برای اندازه ۱۰ میلی متری قطعات ضایعات نشان می‌دهد که در طول ۲۴ ساعت اول بارگذاری ۵۷ میلی‌لیتر گاز تولید شد پس از آن تا روز چهارم افت کرد با افزودن کربنات کلسیم تا روز دوازدهم روند صعودی به خود گرفت و حداکثر میزان گاز را تولید کرد. در روز دوازدهم این منحنی نسبت به دو منحنی دیگر از نظر بیوگاز تولیدی روزانه بیشتر بود و بعد از آن تقریباً هر سه منحنی یک مسیر را طی کردند و از روز هفدهم هیچ گازی تولید نشد.

روند میانگین تولید روزانه بیوگاز برای اندازه ۱۵ میلی متری قطعات ضایعات نشان می‌دهد از روز اول تا روز دوم روند صعودی گرفت و پس از آن تا روز دوازدهم افت و خیزهایی داشت و پس از آن افت شدیدی داشت و نهایتاً مشابه دو تیمار دیگر گازی تولید نشد. مدت زمان ماند برای همه سطوح تیمارها ۲۵ روز در نظر گرفته شده بود. به‌طورکلی در روزهای ابتدایی بارگذاری هاضم‌ها، در میزان بیوگاز تولیدی رشد ناگهانی مشاهده گردید، که یکی از دلایل آن را می‌توان استفاده از کود دامی تازه دانست، زیرا دستگاه گوارش حیوانات نشخوارکننده شرایط فرایند هضم بی‌هوازی را ایجاد می‌کند و سبب رشد میکروارگانیسم‌های متان‌زا می‌گردد. در واقع کود گاوی در فرایند هضم ترکیبی با ضایعات میوه به دلیل تأمین مواد مغذی مورد نیاز برای باکتری‌ها در محیط هضم و نیز کمک به رقیق کردن خوراک شرایط مناسبی را فراهم می‌کند. یکی از دلایل در تسریع تولید بیوگاز در روزهای اول درصد بالای کود گاوی می‌باشد (Fang et al., 2011). اما با عبور از روند افزایشی، در روز دوم میزان بیوگاز تولیدی روند کاهشی از خود نشان داد، که یکی از دلایل آن می‌توان به رشد سریع باکتری‌های اسیدساز و تولید اسیدهای چرب فرار اشاره نمود. اسیدی شدن محیط به کاهش سریع pH می‌انجامد. همان‌طور که در فصل اول توضیح داده شد، محدوده مناسب pH برای هضم بی‌هوازی ۶/۸ تا ۷/۲ است و در صورت پایین‌تر یا بالاتر بودن از این محدوده، اثر بازدارندگی ایجاد و گاز تولیدی کاهش می‌یابد. جهت افزایش pH به محدوده مناسب و رفع اسیدی بودن به هر کدام از تیمارها به میزان ۵ گرم کربنات کلسیم اضافه شد.



شکل ۲- میانگین تولید بیوگاز در روش پیش‌فرآوری مکانیکی خرد کردن: a) تولید روزانه، b) تولید تجمعی

Fig 2. The average production of biogas in the mechanical crushing pretreatment method: a) daily production, b) cumulative production

نتایج میانگین تولید تجمعی بیوگاز در هضم ترکیبی ضایعات میوه و کود گاوی در شکل (۲b) ارائه شده است. بیشترین میزان تولید تجمعی بیوگاز مربوط به منحنی سه (اندازه قطعات ۱۵ میلی متر) با مقدار ۶۷۰ ml/g.TS می‌باشد و رتبه‌های بعدی به ترتیب مربوط به منحنی‌های دو (اندازه قطعات ۱۰ میلی متر) و یک (اندازه قطعات ۵ میلی متر) با مقادیر ۶۲۷ ml/g.TS و ۶۲۰ ml/g.TS میلی‌لیتر بود. این در حالی است که با ریزتر شدن ضایعات، انتظار می‌رود سطح دسترسی باکتری‌ها و آنزیم‌ها به فیبر سلولزی بیشتر شود و بیوگاز تولیدی افزایش یابد؛ اما این نتیجه در آزمایش انجام شده محقق نشد. البته تفاوت بین سطوح اندازه‌ای در این آزمایش بسیار کم بود و از لحاظ آماری معنی‌دار نشد و بی معنی شدن این تفاوت می‌تواند توجیه کننده این نتیجه متفاوت باشد.

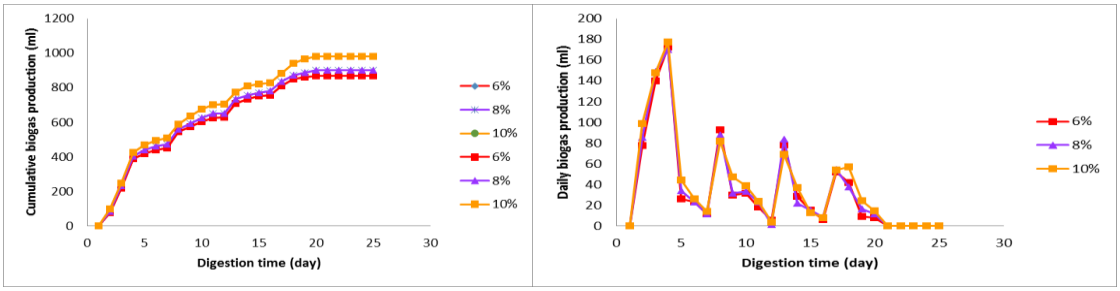
طبق نتایج می‌توان بیان کرد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین اندازه قطعات ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر از لحاظ میزان تولید بیوگاز وجود ندارند. مقایسه میانگین هم نشان می‌دهد که بین سطوح مختلف این روش پیش‌فرآوری (خرد کردن) از نظر میزان تولید بیوگاز تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. نتایج مطالعه Mustafa et al. (2017) بر روی تأثیر پیش‌فرآوری مکانیکی (آسیاب کردن) کاه برنج بر میزان تولید متان، نشان داد که خرد کردن کاه برنج به قطعات ۶۲ میلی‌متری توانست در مدت زمان ماند ۲۵ روز، تولید متان را نسبت به کاه برنج پیش‌فرآوری نشده ۱۶۵ درصد افزایش دهد.

۳-۲- تأثیر پیش‌فرآوری شیمیایی بر میزان تولید بیوگاز

پیش‌فرآوری می‌تواند با مکانیسم‌های مختلف در مقیاس مولکولی، از جمله تغییرات در مواد شیمیایی، بر عملکرد بیوگاز تأثیر بگذارد. نتایج به‌دست آمده از میزان تولید روزانه بیوگاز برای این روش پیش‌فرآوری در شکل (۳a) نشان داده شده است. شکل مذکور میانگین تولید بیوگاز در روش پیش‌فرآوری ضایعات با هیدروکسید سدیم در غلظت های ۶، ۸ و ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. از روز اول تا روز چهارم بیوگاز تولیدی روند رو به رشد خود را طی کرد و در روز چهارم حداکثر گاز تولیدی به میزان ۱۷۵ میلی‌لیتر ثبت شد. از روز چهارم به یکباره افت شدیدی رخ

داد و تا روز بیستم همین افت و خیزها ادامه داشت از روز بیستم تا پایان فرایند در هیچ یک از سه منحنی گازی تولید نشد. منحنی دوم نشان‌دهنده سطح دوم تیمار یعنی استفاده از هیدروکسید سدیم با غلظت ۸ درصد می‌باشد. در این منحنی نیز از روز اول تا روز چهارم مقدار حداکثر گاز تولید شد و تا روز بیستم با نوسان تقریباً یکسان با روش قبلی پیش رفت. کاهش گاز تولیدی معمولاً نشانه اسیدی بودن محیط است و برای رفع این مشکل، مقدار ۵ گرم کربنات کلسیم اضافه شد. منحنی سوم میانگین مقادیر تولید بیوگاز را برای پیش‌فرآوری با هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۰ درصد را نمایش می‌دهد. این منحنی نیز روندی مشابه دو منحنی دیگر را طی کرد با این تفاوت که نسبت به دو تیمار دیگر بیوگاز تولیدی بیشتر بود.

Ruiz et al. (2012) در پژوهشی با روش شیمیایی افزودن حلال آلی، کاه گندم را پیش‌فرآوری کردند و به بازده ۶۴ درصد تولید گلوکز در فرایند هیدرولیزآنزیمی دست یافتند. Salehi et al. (2012) در پژوهشی کاه برنج را با استفاده از کربنات سدیم در یک هاضم تحت فشار پیش‌فرآوری کردند و در مرحله هیدرولیز به بازده بالاتر از ۹۰ درصد دست یافتند. Gaballah et al. (2020) کاه (rape) را با استفاده از H2SO4 پیش تیمار کردند و دریافتند که بازده تولید متان نسبت به حالت بدون پیش تیمار ۷۷/۸۴٪ افزایش یافت.



شکل ۳- میانگین تولید بیوگاز در روش پیش‌فرآوری شیمیایی NaOH: a) تولید روزانه، b) تولید تجمعی

Fig 3. Average biogas production in NaOH chemical pretreatment method: a) daily production, b) cumulative production

شکل (۳b) میانگین بیوگاز تجمعی در روش هیدروکسید سدیم را نشان می‌دهد. براساس نمودار فوق، میانگین بیوگاز تولیدی در روش پیش‌فرآوری با هیدروکسید سدیم با غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ درصد به ترتیب برابر با ۸۶۷ ml/g.TS، ۸۹۹ ml/g.TS و ۹۷۹ ml/g.TS می‌باشد. بیشترین گاز تولیدی مربوط به سطح سوم تیمار یعنی غلظت ۱۰ درصد می‌باشد.

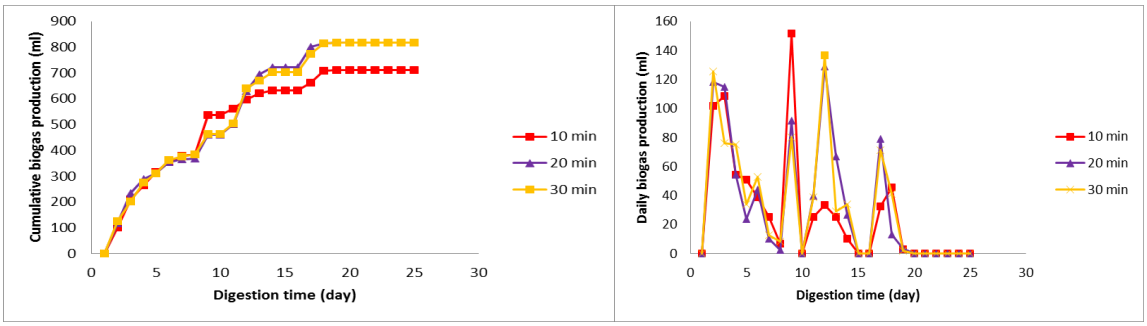
آزمون مقایسه میانگین نیز نشان داد که سطوح یک (غلظت ۶ درصد) و سه (غلظت ۱۰ درصد) و نیز سطح دو و سطح سه با هم اختلاف بسیار معنی‌داری دارند. یک (غلظت ۶ درصد) و دو (غلظت ۸ درصد) با هم اختلاف معنی‌داری ندارند. Ugwu and Enweremadu (2019) در طی پژوهشی ضایعات بامیه را تحت پیش‌فرآوری هیدروکسید سدیم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو- هیدروکسید سدیم قرار دادند و دوغاب گوسفند به همراه ضایعات بامیه در نسبت‌های مختلف ۲۵ درصد ، ۵۰ درصد و ۱۰۰درصد در هاضم ناپیوسته در دمای مزوفیلیک ۳۷ درجه سلسیوس به مدت ۲۵ روز قرار گرفتند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که بازده تجمعی بیوگاز از نمونه پیش‌فرآوری هیدروکسید سدیم در مقایسه با نمونه شاهد ۴۵/۸۷ درصد افزایش داشت و سایر نمونه‌های پیش‌فرآوری شده از نظر آماری با ضایعات بامیه تیمار نشده در سطح اطمینان ۹۵ درصد یکسان بودند.

Gulsen Akbay et al. (2021) ضایعات حاصل از تولید صنعتی آبمیوه را تحت پیش تیمار ترکیبی آلکالی و حرارتی قرار دادند و نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که تولید تجمعی بیوگاز به مقدار ۳۶٪ افزایش یافت.

۳-۳- تأثیر پیش‌فرآوری مایکروویو بر میـزان تولیـد بیوگاز

شکل (۴a) میانگین تولید روزانه بیوگاز را برای سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه روش پیش‌فرآوری حرارتی ضایعات میوه با مایکروویو نشان می‌دهد. میانگین بیوگاز تولیدی از هضم ترکیبی کود گاوی به همراه ضایعات میوه (سیب و توت‌فرنگی) پیش‌فرآوری شده که به مدت زمان ۱۰ دقیقه در مایکروویو نشان می‌دهد از روز اول تا روز سوم گازی به میزان ۱۰۸ میلی‌لیتری تولید شد سپس روز به روز افت نمود تا اینکه روز هشتم به محدوده صفر رسید با افزودن کربنات کلسیم به یکباره روند حالت صعودی گرفت و حداکثر میزان تولیدی گاز در روز نهم به میزان ۱۵۰ میلی‌لیتر ثبت شد. پس ازآن با افت و خیز نه‌چندان قابل توجهی، نهایتاً روز بیستم به حداقل ممکن خود رسید و تا پایان فرایند همین روند بدون تولید گاز تداوم داشت. منحنی میانگین تولید روزانه بیوگاز از پیش‌فرآوری قرارگیری ضایعات میوه به مدت زمان ۲۰ دقیقه در داخل مایکروویو از روز اول فاز تأخیر را نشان نمی‌دهد. در صورتی

که در حالت معمول با تغذیه خوراک به درون هاضم مدتی طول می‌کشد تا میکروارگانیسم‌ها با محیط جدید سازگاری پیدا کنند. در این مدت تعداد سلول‌ها بدون تغییر باقی می‌مانند و هیچ گازی تولید نمی‌شود ولی در این روش چنین اتفاقی رخ نداد (Kole et al., 2012). از روز اول تا روز دوم میزان ۱۲۰ میلی‌لیتر گاز تولید شد و تا روز سوم تداوم داشت و از آن روز تا روز هشتم کاهش پیدا کرد و با افزودن کلسیم کربنات بار دیگر در طول ۲۴ ساعت میزان ۹۰ میلی‌لیتر گاز تولید شد وسپس افت نمود. در روز دوازدهم حداکثر میزان گاز تولیدی به میزان ۱۳۰ میلی‌لیتر ثبت گردید. پس از آن تا روز بیستم افت تولید بیوگاز به حالت نوسانی ادامه یافت و نهایتاً از روز بیستم به بعد تا پایان هضم هیچ گازی تولید نشد. منحنی شماره سه، میانگین روزانه بیوگاز تولیدی مربوط به پیش‌فرآوری قرار دادن ضایعات میوه به مدت زمان ۳۰ دقیقه در داخل مایکروویو را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، از روز اول تا روز دوم روند صعودی داشته و سپس به‌صورت پلکانی تا روز هشتم افت پیدا کرد. پس از کنترل میزان pH و کاهش چشمگیر آن، مقدار ۵ گرم کربنات کلسیم اضافه شد تا بار دیگر روند صعودی شود. در روز دوازدهم حداکثر بیوگاز تولیدی به میزان ۱۳۸ میلی‌لیتر به ثبت رسید. بار دیگر پس از اسیدی شدن محیط، تولید بیوگاز به حداقل رسید و تا روز نوزدهم نوساناتی داشت. نهایتاً از روز بیستم تا پایان فرایند هضم گازی تولید نشد. نتایج مطالعه Muller et al. (2003) نشان داد که زمان تابش و توان مایکروویو بر عملکرد روش پیش‌فرآوری و در نتیجه میزان تولید بیوگاز تأثیرگذار است. Rajput and Visvanathan, (2018) در طی پژوهشی پیش‌فرآوری حرارتی بر روی کاه گندم اعمال کردند نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که بازده تولید متان نسبت به حالت بدون پیش‌فرآوری ۵۳ درصد افزایش داشته است و با افزایش دمای پیش‌فرآوری زمان ماند کوتاه‌تر شده است. Rajput et al. (2020) نتایج مشابهی را در مورد بهبود عملکرد تولید متان در اثر پیش تیمار حرارتی کاه گندم و بقایای آفتابگردان گزارش کردند.



شکل ۴- میانگین تولید بیوگاز در روش پیش‌فرآوری حرارتی مایکروویو: a) تولید روزانه، b) تولید تجمعی

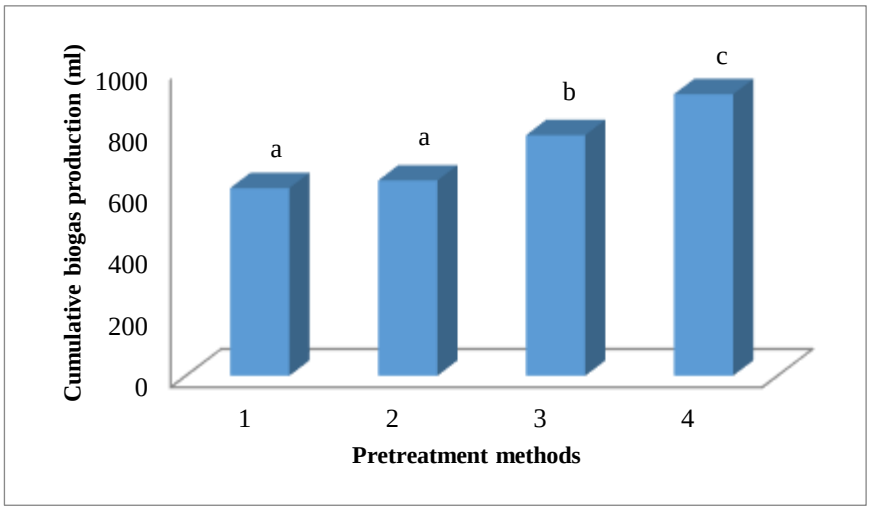
Fig 4. Average biogas production in the microwave heat pretreatment method: a) daily production, b) cumulative production

شکل (4b) روند تولید تجمعی بیوگاز را برای پیش‌فرآوری مایکروویو در سه سطح زمان و توان ثابت ۸۰۰ وات نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، میزان بیوگاز تولیدی در منحنی‌های اول (۱۰ دقیقه)، دوم (۲۰ دقیقه) و سوم (۳۰ دقیقه) به ترتیب برابر با ۷۰۰ ml/g.TS، ۸۰۷ و ۸۱۰ می‌باشد. منحنی اول مسیر جداگانه‌ی را نسبت به دو منحنی دیگر طی کرده است.

مقایسه میانگین هم نشان داد که بین سطح یک (۱۰ دقیقه) و سه (۳۰ دقیقه) تفاوت معنی‌داری وجود دارد ولی بین سطوح دو (۲۰ دقیقه) و سه (۳۰ دقیقه) تفاوت معنی‌دار نیست. Zhu et al. (2005) طی تحقیقی به این نتیجه رسیدند که توان مایکروویو بالاتر با زمان پیش‌فرآوری کوتاه‌تر و توان مایکروویو کمتر با زمان پیش‌فرآوری طولانی‌تر تقریباً تأثیر یکسانی در مصرف انرژی دارد. Singh et al. (2019) در طی مطالعه‌ی با استفاده از ترکیب پیش‌فرآوری مایکروویو با هیدروکسید سدیم بر روی زباله آشپزخانه بازده متان و بیوگاز بیشتری حاصل شد و پیش‌فرآوری مایکروویو موجب تخریب و حذف لیگنین شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در پژوهش حاضر نیز عملکرد پیش‌فرآوری مایکروویو خوب بوده و سبب افزایش تولید گاز شده است.

۴-۳- مقایسه نتایج به‌دست آمده از سه روش پیش‌فرآوری و نمونه بدون پیش‌فرآوری

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش‌ها پیش‌فرآوری، بین روش‌های مختلف پیش‌فرآوری آزمایش شده در پژوهش حاضر از نظر تأثیرگذاری بر میزان تولید بیوگاز تفاوت بسیار معنی‌دار وجود دارد. نتایج نشان دادند که روش پیش‌فرآوری با هیدروکسید سدیم با ۹۱۵ ml/g.TS بیشترین تأثیر را بر میزان تولید بیوگاز داشته و پس از آن روش مایکروویو ۷۷۲ ml/g.TS و خرد کردن ۶۳۹ ml/g.TS در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.



شکل ۵- مقایسه میانگین بیوگاز تولیدی تجمعی سه روش پیش‌فرآوری و روش بدون پیش‌فرآوری
Fig 5. Comparison of average cumulative biogas production of pretreatment

نتایج مقایسه میانگین در شکل (۵) ارائه شده است. تیمارها با حروف الفبا (a, b, c, …) نشان داده می‌شوند. تیمارهایی که تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارند با حروف یکسان نشان داده می‌شوند و تیمارهایی که به طور قابل توجهی متفاوت هستند با حروف متفاوت نشان داده می‌شوند. این نتایج بیان‌گر وجود اختلاف بسیار معنی‌دار بین هر سه روش هستند همان طور که از نمودار فوق پیداست پیش‌فرآوری خرد کردن با بیوگاز تجمعی به میزان ۶۳۹ ml/g.TS نسبت به نمونه شاهد با ۶۰۶ ml/g.TS از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. و روش مایکروویو با گاز تجمعی به میزان ۷۷۲ ml/g.TS نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار بود . هیدروکسید سدیم نیز با ml/g.TS ۹۱۵ نسبت به نمونه شاهد و خرد کردن بسیار معنی‌دار بود.

در یک مطالعه چهار روش مختلف پیش‌فرآوری شامل استفاده از اسید سولفوریک، هیدروکسید سدیم، آمونیاک آبی و کربنات سدیم، بر روی کاه برنج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بالاترین بازده متان (۳۳۸ میلی‌لیتر بر گرم جامد فرار) در روش استفاده از هیدروکسید سدیم حاصل شد (Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2021). این نتیجه مشابه با نتیجه به دست آمده در مطالعه حاضر است.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش تأثیر سه روش پیش‌فرآوری بر میزان هضم‌پذیری ضایعات محصولات سیب و توت فرنگی در فرایند تولید بیوگاز مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های پیش‌فرآوری مورد آزمایش شامل خرد کردن، حرارت دهی با مایکروویو و استفاده از هیدروکسید سدیم بودند. ضایعات پس از پیش‌فرآوری با فضولات دامی ترکیب شده و به مدت ۲۵ روز در هاضم‌های ناپیوسته در محدوده دمایی مزوفیلیک قرار داده شدند و مقادیر بیوگاز تولیدی ثبت شد. نتایج زیر از آزمایش‌ها به‌دست آمد:

- پیش‌فرآوری خرد کردن بر روی ضایعات میوه (سیب و توت‌فرنگی) در اندازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر سبب تولید بیوگاز به میزان ۶۳۹ ml/g.TS شد.
- در پیش‌فرآوری مایکروویو، ضایعات در زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه تحت توان ۸۰۰ وات قرار گرفتند و بیوگاز به میزان ml/g.TS ۷۷۲ تولید شد.
- پیش‌فرآوری هیدروکسید سدیم بیشترین تأثیر را بر میزان تولید بیوگاز به میزان ۹۱۵ ml/g.TS داشت.
- بیوگاز تولیدی در نمونه بدون پیش‌فرآوری، به عنوان شاهد، برابر با ۶۰۶ ml/g.TS بود.
- نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش نشان داد که بین سطوح مورد آزمایش در روش خرد کردن اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. این تفاوت بین سطوح مورد آزمایش در روش مایکروویو و هیدروکسید سدیم به ترتیب در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد معنی‌دار بودند.
- نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که تفاوت تأثیر روش پیش‌فرآوری هیدروکسید سدیم نسبت به روش مایکروویو در سطح ۵ درصد معنی‌دار و نسبت به روش‌های خرد کردن و بدون پیش‌فرآوری در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. اختلاف تأثیر روش مایکروویو نیز نسبت به روش‌های خرد کردن و شاهد در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

منابع

Abraham, A., Mathew, A.K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., Pandey, A., Park, J.H., Sang, B.I. (2020). *Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass.* Bioresource Technology, 301: 122725.

Afazeli, H., Jafari, A., Rafiee, S. and Nosrati, M. (2014). *An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34: 380-386.

Agarwal, A., Paritosh, K., Dangayach, P. (2021). *Hydrothermal, acidic, and alkaline pretreatment of waste flower-mix for enhanced biogas production: a comparative assessment.* Biomass Conversion and Biorefinery, 11(3). https://doi.org/10.1007/s13399-021-01607-6

Anonymous. (2020). *Food and agriculture data (FAOSTAT)*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. https://www.fao.org

Chagali, A. and Abbasi, A. (2017). *Management of fruit and vegetable waste in Tehran*. The fifth international management conference, Tehran, Iran.

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, 3: 273–282.

Dahunsi, S.O. (2019). *Mechanical pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: Methane yield prediction from biomass structural components.* Bioresource Technology, 280: 18-26.

Emiliano, B., Anders, P.J. and Irini, A. (2010). *Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production.* Journal of Bioresource Technology, 101: 8713-8717.

Eskicioglu, C., Kennedy, K.J., Droste, R.L. (2007). *Enhancement of batch waste anaerobic sludge digestion by microwave pretreatment.* Water Environment Research, 79: 2304–2317.

Fang, C., Boe, K. and Angelidaki, I. (2011). *Anaerobic co- digestion of by- products from sugar production with cow manure*. Water Research, 45: 3473-3480.

Feng, R., Zaidi, A.A., Zhang, K., Shi, Y. (2018). *Optimization of microwave pretreatment for biogas enhancement through anaerobic digestion of microalgal biomass. Period. Polytech.* Chemical Engineering, 63: 65–72.

Gaballah, E.S., Abomohra, A.E.F., Xu, C., Elsayed, M., Abdelkader, T.K., Lin, J. and Yuan, Q. (2020). *Enhancement of biogas production from rape straw using different co-pretreatment techniques and anaerobic co-digestion with cattle manure.* Bioresource Technology, 309: 123311.

Gulsen Akbay, H.E., Dizge , N. and Kumbur, H. (2021). *Enhancing biogas production of anaerobic co-digestion of industrial waste and municipal sewage sludge with mechanical, chemical, thermal, and hybrid pretreatment.* Bioresource Technology, 340: 125688.

Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X. (2017). *Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76: 1485–1496.

Hermann, C., Heiermann, M., Idler, C. and Prochnow, A. (2012). *Particle size reduction during harvesting of crop feedstock for biogas production I: Effects on ensiling process and methane yields.* Biomass and Bioenergy, 5: 926-936.

Jackowiak, D., Frigon, J.C., Ribeiro, T., Pauss, A., Guiot, S. (2011). *Enhancing solubilisation and methane production kinetic of switchgrass by microwave pretreatment.* Bioresource Technology, 102: 3535–3540.

Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A. and Luczkiewicz, A. (2021). *Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150: 111509.

Kaur, K., Phutela, U.G. (2016). *Enhancement of paddy straw digestibility and biogas production by sodium hydroxide-microwave pretreatment*. Renewable Energy, 92: 178–184.

Kole, C., Joshi, C.P. and Shonnard, D.R. (2012). *Handbook of bioenergy crop plants (1st ed.)*. CRC Press. pp. 824.

Li, Y., Merrettig-Bruns, U., Strauch, S., Kabasci, S., Chena, H. (2015). *Optimization of ammonia pretreatment of wheat straw for biogas production.* Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 90: 130–138.

Menardo, S., Airoldi, G. and Basari, P. (2012). *The effect of particle size and thermal pre-treatment on the methane yield of four agricultural by-products.* Journal of Bioresource Technology, 104: 708-714.

Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Azarbaijani, R., Yeganeh, L. P., Angelidaki, I., Nizami, A. S. and Tabatabaei, M. (2021). *Pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: A review on influencing mechanisms and the importance of microbial diversity.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135: 110173.

Muller, C. D., Abu-Orf, M. and Novak, J. T. (2003). *The effect of mechanical shear on mesophilic anaerobic digestion.* Proceedings of the Water Environment Federation, 12: 558-578.

Mustafa, A. M., Poulsen, T. G., Xia, Y. and Sheng, K. (2017). *Combinations of fungal and milling pretreatments for enhancing rice straw biogas production during solid-state anaerobic digestion. Bioresource Technology*, 224: 174-182.

Naik, G.P., Poonia, A.K. and Chaudhari, P.K. (2021). *Maximization of biogas by minimal microwave and*

Yang, L., Xu, F., Ge, X., Li, Y. (2015). *Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44: 824–834.

You, Z., Pan. S.Y., Sun, N., Kim, H. and Chiang, P.C. (2019). *Enhanced corn-stover fermentation for biogas production by NaOH pretreatment with CaO additive and ultrasound*. Journal of Cleaner Production, 238: 117813.

Yu, Q., Liu, R., Li, K. and Ma, R. (2019). *A review of crop straw pretreatment methods for biogas production by anaerobic digestion in China.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 107: 51–58.

Zareei, S. (2018). *Evaluation of biogas potential from livestock manures and rural wastes using GIS in Iran.* Renewable Energy, 118: 351-356.

Zareei, S. and Khodaei, J. (2017). *Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system.* Renewable Energy, 114: 423-427.

Zehra, S. (2013). *The effect of microwave pretreatment on biogas production from agricultural straws.* Journal of Bioresource Technology, 128: 487-494.

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

Zhang, Z., Zhang, G., Li, W., Li, C., Xu, G. (2016). *Enhanced biogas production from sorghum stem by codigestion with cow manure.* International Journal of Hydrogen Energy, 41: 9153–9158.

Zhao, Y., Wang, Y., Zhu, J. Y., Ragauskas, A. and Deng, Y. (2008). *Enhanced enzymatic hydrolysis of spruce by alkaline pretreatment at low temperature.* Biotechnology and Bioengineering, 99(6): 1320-1328.

Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Liao, J. and Zhang, Y. (2005). *Pretreatment by microwave/alkali of rice straw and its enzymic hydrolysis.* Process Biochemistry, 40 (9): 3082-3086.

alkaline pretreatment of rice straw. Biomass Conversion and Biorefinery, 98(10): 100147.

Noorollahi, Y., Kheirrouz, M., Farabi-Asl, H., Yousefi, H. and Hajinezhad, A. (2015). *Biogas production potential from livestock manure in Iran.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50: 748-754.

Patinvoh, R.J., Osadolor, O.A., Chandolias, K., Horváth, I.S. and Taherzadeh, M.J. (2017). *Innovative pretreatment strategies for biogas production.* Bioresource Technology, 224: 13–24.

Pellera, F.M., Gidarakos, E. (2016). *Microwave pretreatment of lignocellulosic agro industrial waste for methane production.* Journal of Environmental Chemical Engineering, 5: 352–365.

Qian, X., Shen, G., Wang, Z., Zhang, X., Chen, X., Tang, Z., Lei, Z. and Zhang, Z. (2019). *Enhancement of high solid anaerobic co-digestion of swine manure with rice straw pretreated by microwave and alkaline.* Bioresource Technology Reports, 7: 100208.

Rajput, A. A. and Visvanathan, C. (2018). *Effect of thermal pretreatment on chemical composition, physical structure and biogas production kinetics of wheat straw*. Journal of Environmental Management, 221: 45-52.

Rajput, A.A., Zeshan, and Hassan, M. (2020). *Enhancing biogas production through co-digestion and thermal pretreatment of wheat straw and sunflower meal.* Renewable Energy, 168: 1-10.

Ruiz, H. A., Vicente, A. A. and Teixeira, J. A. (2012). *Kinetic modeling of enzymatic saccharification using wheat straw pretreated under autohydrolysis and organosolv process*. Industrial Crops and Products, 36 (1): 100-107.

Salehi, S. A., Karimi, K., Behzad, T. and Poornejad, N. (2012). *Efficient conversion of rice straw to bioethanol using sodium carbonate pretreatment.* Energy and fuels, 26 (12): 7354-7361.

Singh, P. K., Verma, S. K., Ojha, S. K., Panda, P. K., Srichandan, H., Jha, E. and Mishra, S. (2019). *Intrinsic molecular insights to enhancement of biogas production from kitchen refuse using alkaline-microwave pretreatment*. Scientific Reports, 9(1): 1-12.

Taherzadeh, M. J. and Karimi, K. (2008). *Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review.* International Journal of Molecular Sciences, 9(9):1621-1651.

Talha, Z., Hamid, A., Guo, D., Hassan, M., Mehryar, E., Okinda, C. and Ding, W. (2018). *Ultrasound assisted alkaline pre-treatment of sugarcane filter mud for performance enhancement in biogas production.* International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1): 226-231.

Ugwu, S. N. and Enweremadu, C. C. (2019). *Effects of pre-treatments and co-digestion on biogas production from Okra waste.* Journal of Renewable and Sustainable Energy, 11(1): 013101.