

Investigation of Biogas Production from Palm Tree Leaf Using Dilute Acid and Ozone Pretreatment

Maryam Keshaii Jahromi

M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Jahrom University, P.O. Box 74135-111, Jahrom, Iran.

Ehsan Houshyar

*epartment of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Jahrom University, P.O. Box 74135-111, Jahrom, Iran. **(Corresponding Author)**
Houshyar.e@gmail.com

Abstract

Background and Objective: Iran is one of the countries with abundant palm groves, and we must look for appropriate solutions to use palm tree lignocellulosic waste. In this regard, the potential for biogas production from palm tree leaf waste is very important as an accessible and indigenous source in the country.

Materials and methods: The combined effects of sulfuric acid percentage were studied at four levels, and the pretreatment time at two levels. Also, the combined impact of ozonation time was studied at three levels, and the moisture content of palm tree leaves was studied at two levels. All experiments on the amount of biogas and methane produced were conducted based on a factorial design. The main and interaction effects of the factors were analyzed using SPSS 22 software and Duncan's test.

Results: The maximum daily biogas production reached 540 ml/L with 1% acid concentration and 440 ml/L with 4 hours of ozonation. Based on the cumulative methane produced and the amount of volatile solids (VS) reduced, the best acid pretreatment can yield approximately 374 ml/gr VS of biogas and 173 ml/gr VS of pure methane. In comparison, the best ozone pretreatment can produce around 175 ml/gr VS of biogas and 64 ml/gr VS of pure methane.

Conclusion: The lignocellulosic biomass of palm tree leaves can be effectively used for energy production with appropriate pretreatment. Further research is essential to evaluate alternative pretreatment methods to determine the best approach to maximize biogas yield from this affordable and readily available resource.

Keywords: Biogas, Methane, Anaerobic Digestion, Lignocellulosic Wastes, Renewable Energy, Palm Tree

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2025/04/27
Accepted: 2025/08/25
Doi:10.22038/jreh.2025.90016.1725

► **Citation:** Keshaii Jahromi M, Houshyar E. Investigation of Biogas Production from Palm Tree Leaf Using Dilute Acid and Ozone Pretreatment . *Journal of Research in Environmental Health*. 11(3):33-47.

ارزیابی تولید بیوگاز از برگ درخت نخل با استفاده از پیش‌فرآوری اسید رقیق و گاز ازن

مریم کشائی جهرمی

دانشجوی کارشناسی ارشد انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

احسان هوشیار

* دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران.

(نویسنده مسئول)

Houshyar.e@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: ایران یکی از کشورهای دارای نخلستان‌های فراوان است و بایستی به دنبال راهکارهای مناسب در جهت استفاده از ضایعات لیگنوسلولزی درخت نخل باشیم. در این راستا پتانسیل تولید بیوگاز از ضایعات برگ درخت نخل به عنوان یک منبع در دسترس و بومی کشور بسیار ضروری است.

مواد و روش‌ها: اثر ترکیبی درصد اسیدسولفوریک در چهار سطح و زمان پیش‌فرآوری در دو سطح مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر ترکیبی زمان ازن‌دهی در سه سطح و میزان رطوبت برگ درخت نخل در دو سطح بررسی گردید. تمامی آزمایشات در میزان بیوگاز و متان تولیدی بر مبنای فاکتوریل انجام شد و اثرات ساده و ترکیبی عوامل با نرم‌افزار SPSS 22 و آزمون دانکن تجزیه و تحلیل گردید.

یافته‌ها: حداکثر مقدار تولید روزانه بیوگاز با غلظت ۱٪ اسید ۵۴۰ میلی‌لیتر در لیتر و با ۴ ساعت ازن‌زنی ۴۴۰ میلی‌لیتر در لیتر به دست آمد. بر طبق مقدار متان تجمعی تولیدشده و مقدار مواد جامد فرار کاهش یافته می‌توان گفت که با بهترین پیش‌فرآوری اسیدی می‌توان حدود ۳۷۴ میلی‌لیتر در گرم VS و ۱۷۳ میلی‌لیتر در گرم VS بیوگاز و متان خالص تولید کرد. در مقایسه با بهترین پیش‌فرآوری ازن می‌توان حدود ۱۷۵ میلی‌لیتر در گرم VS و ۶۴ میلی‌لیتر در گرم VS بیوگاز و متان خالص دست یافت.

نتیجه‌گیری: از منابع لیگنوسلولزی برگ‌های درخت نخل به خوبی می‌توان با پیش‌فرآوری مناسب در جهت تولید انرژی اقدام نمود. تحقیقات بیشتری در جهت ارزیابی روش‌های دیگر پیش‌فرآوری نیز ضروری است تا بهترین روش با بالاترین بازده تولید بیوگاز از این منبع ارزان و در دسترس به دست آید.

کلیدواژه‌ها: بیوگاز، متان، هضم بی‌هوازی، ضایعات لیگنوسلولزی، انرژی تجدیدپذیر، درخت نخل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

◀ **استناد:** کشائی جهرمی م، هوشیار ا. ارزیابی تولید بیوگاز از برگ درخت نخل با استفاده از پیش‌فرآوری اسید رقیق و گاز ازن. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. پاییز ۱۴۰۴؛ ۱۱(۳): ۳۳-۴۷.

امروزه با افزایش چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار بیش از پیش ضرورت یافته است. در این میان، تولید بیوگاز از بقایای کشاورزی به‌ویژه ضایعات درخت نخل، به‌عنوان یک راهکار اقتصادی و اکولوژیکی مطرح شده است (۱ و ۲). نخلستان‌های گسترده در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان، سالانه مقادیر قابل توجهی بقایای لیگنوسلولزی مانند تنه، برگ، خوشه‌های میوه و الیاف نخل تولید می‌کنند که معمولاً به‌صورت مدیریت‌نشده سوزانده یا دفن می‌شوند. یک درخت به‌طور متوسط سالیانه بین ۲۵ تا ۴۰ کیلوگرم برگ خشک تولید می‌کند (۳). این امر نه‌تنها آلودگی منابع آب، هوا و خاک را به‌دنبال دارد، بلکه سبب از دست‌رفتن یک منبع بالقوه‌ی انرژی می‌شود.

در فرآیند هضم بی‌هوازی جهت تولید بیوگاز چهار مرحله‌ی اساسی بایستی طی شود که عبارتند از: هیدرولیز، اسیدزایی، استات‌زایی، و متان‌زایی. مرحله‌ی هیدرولیز یک مرحله‌ی محدودکننده است که سرعت فرآیند هضم بی‌هوازی را معین می‌کند و به‌خصوص در مواد نشاسته‌ای و لیگنوسلولزی اهمیت بیشتری دارد، زیرا ساختار این مواد دسترسی باکتری‌ها به پلیمرهای پیچیده را محدود کرده و سرعت هضم کاهش می‌یابد. روش‌های پیش‌فرآوری مختلف فیزیکی و شیمیایی توسعه داده شده تا این ساختار پیچیده را شکسته و سرعت هیدرولیز را بهبود بخشد (۴ و ۵). تحقیقات مختلفی در رابطه با کاربرد انواع روش‌ها بر روی مواد مختلف به‌طور پیوسته در حال انجام است تا بهترین حالت پیش‌فرآوری برای هر ماده‌ی خام لیگنوسلولزی به‌دست آید.

ظاهر داناک و همکاران در استفاده از اسیدسولفوریک رقیق برای بهبود تولید بیوگاز از گیاه گندم با پیش‌فرآوری در دمای ۱۲۱ درجه سانتیگراد برای مدت زمان‌های مختلف ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه نشان دادند که حداکثر بازده متان ۳۰۲/۴ میلی‌لیتر در گرم VS پس از پیش‌فرآوری ۱۲۰ دقیقه‌ای به‌دست آمد که تنها ۱۵/۵٪ بیشتر از تیمار بدون پیش‌فرآوری بود (۶). سیوای چوروزی و همکاران در سال ۲۰۱۹ در مطالعه‌ای نشان دادند که گرمایش مایکروویو همراه با پیش‌فرآوری اسیدسولفوریک به‌طور قابل توجهی تولید بیوگاز از زیست توده ذرت سیلویی را افزایش می‌دهد (۷). حسن و همکاران در یک مطالعه نشان دادند که پیش‌فرآوری با گاز ازن

به‌طور قابل توجهی تولید بیوگاز از جلبک سبز را افزایش می‌دهد، به‌طوری‌که بالاترین بازده بیوگاز با ۴۹۸/۷۵ میلی‌لیتر بر گرم مواد فرار با استفاده از تلقیح کود گاوی در دوز ازن ۲۴۹ میلی‌گرم ازن بر گرم مواد فرار حاصل شد (۸). هدایی و همکاران به بررسی تأثیر پیش‌فرآوری ازن‌زنی بر تولید بیوگاز از لجن فعال غلیظ‌شده پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که دوز پایین‌تر ازن برای تولید بیوگاز عملکرد خوبی دارد، در حالی‌که دوز بالاتر باعث کاهش بازده بیوگاز و افزایش تقاضای انرژی می‌شود. به‌طور کلی، اثربخشی پیش‌تیمار ازن‌زنی با زمان‌های ماند طولانی‌تر کاهش یافت که نشان‌دهنده‌ی تأثیر پیچیده‌ی آن بر تولید بیوگاز است (۹).

فرآیند هضم بی‌هوازی منجر به کاهش حجم مواد شده و آلودگی‌ها و آفات احتمالی در ضایعات را از بین می‌برد. از دیدگاه اقتصادی، استفاده از این ضایعات به‌عنوان ماده‌ی اولیه-ی تولید بیوگاز، هزینه‌های مدیریت پسماند را کاهش می‌دهد و در عین‌حال، انرژی تجدیدپذیری برای مصارف خانگی یا صنعتی را فراهم می‌کند (۱۰ و ۱۱). مواد به‌دست آمده از هاضم‌های بی‌هوازی نیز می‌توانند در مراحل بعدی به‌عنوان کود کشاورزی و یا کمپوست به‌صورت تکی یا ترکیبی با مواد دیگر به‌کار گرفته شوند. به این ترتیب احتمالاً بخشی از نیاز خاک کشاورزی به مواد آلی برطرف خواهد شد.

اما با توجه به این‌که درخت نخل و محصول خرما بومی برخی کشورهای خاص می‌باشد تحقیقات مرتبط با تولید انرژی از بقایای این درخت هنوز خیلی گسترده نمی‌باشد. شهرستان جهرم در جنوب استان فارس حدود ۲۵٪ خرما را در استان فارس را تولید می‌کند و یکی از قطب‌های مهم تولید خرما در استان فارس به‌شمار می‌رود. با توجه به میزان بقایای برگ درخت خرما و اهمیت تولید انرژی پاک تحقیقات مناسبی باید صورت پذیرد تا از این مواد در دسترس بهترین استفاده ممکن شود. بنابراین با توجه به تحقیقات گذشته که اثر اسید رقیق و ازن را بر روی مواد لیگنوسلولزی مثبت ارزیابی کرده‌اند، هدف پژوهش حاضر بررسی اثر پیش‌فرآوری اسید رقیق و ازن بر روی چوب درخت خرما و مقدار تغییر در تولید بیوگاز از آن می‌باشد. با توجه با اطلاعات موجود در این پژوهش برای اولین بار اثر پیش‌فرآوری اسید رقیق و ازن بر روی مقدار بیوگاز از چوب درخت خرما بررسی می‌شود.

روش کار

آماده سازی مواد خام

حدود ۱۰۰ کیلوگرم نمونه چوب برگ درخت خرما از سطح ۳ باغ از باغات شهرستان جهرم به دست آمد و با آسیاب صنعتی به ذرات بزرگ تبدیل شد. سپس با آسیاب آزمایشگاهی ۲۰۰۰۰ دور در دقیقه آسیاب شده و با الک ۰/۵ میلیمتر الک شد تا ذرات ریز و یکنواخت به دست آید (شکل ۱). قابل ذکر است که بالای ۹۰٪ خرما شهرستان از نوع شاهانی می باشد و چوب جمع آوری شده نیز مربوط به همین نمونه خرما می باشد.



شکل ۱. برگ درخت خرما و ذرات آسیاب شده آن

پیش فرآوری اسید رقیق و ازن

در آزمایشات از پیش فرآوری اسید رقیق با استفاده از اسیدسولفوریک ۹۹٪ (شرکت مرک) استفاده گردید. چندین پژوهش جهت پیش تیمار مواد مختلف لیگنوسلولزی با اسیدسولفوریک رقیق در محدوده ۰/۵ تا ۲ درصد و زمان کمتر از ۱۲۰ دقیقه به نتایج خوبی رسیده اند (۶ و ۱۲). با در نظر گرفتن پژوهش های گذشته درصد اسیدسولفوریک در چهار سطح (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد با نام های A1 تا A4) و زمان پیش فرآوری در دو سطح ۴۰ و ۸۰ دقیقه (با نام های B1 و B2) در دمای °C ۲۷-۳۰ با دو تکرار مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین تعداد کل آزمایشات با بهره گیری از آزمایشات فاکتوریل ۱۶ عدد (۴×۲×۲) می باشد.

در پیش فرآوری با گاز ازن مقدار ازن زمان و رطوبت مواد در نظر گرفته می شود که محدوده مورد نظر با توجه به پیشینه پژوهش انتخاب گردید (۸). در آزمایشات پیش فرآوری با گاز ازن، زمان ازن دهی در سه سطح ۰، ۲ و ۴ ساعت (با نام های O1 تا O3) و میزان رطوبت برگ درخت نخل در دو سطح ۳۰٪ و ۵۰٪ (با نام های M1 و M2) در دمای °C ۲۷-۳۰ با دو تکرار بررسی گردید. بنابراین تعداد کل آزمایشات با بهره گیری از آزمایشات فاکتوریل ۱۲ عدد (۳×۲×۲) می باشد.

جهت اطمینان از رطوبت ۳۰ و ۵۰ درصد برگ درخت نخل، ابتدا مواد در آون در دمای به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و سپس در ۷۰ و ۵۰ گرم چوب درخت، به ترتیب ۳۰ و ۵۰ سی سی آب اضافه شد تا رطوبت به مقدار ۳۰٪ و ۵۰٪ برسد. میزان غلظت ازن به صورتی تنظیم شد که در بطری حاوی مواد هر ۱۰ دقیقه به مدت یک دقیقه ۲۰ گرم گاز ازن تزریق می شود. تزریق گاز ازن با دستگاه ازن ساز ۲۰ گرمی (مدل DNC 20G ساخت چین) انجام گردید.

هاضم های آزمایشگاهی و اندازه گیری بیوگاز

پس از پیش فرآوری مواد آماده ورود به هاضم ها هستند. آزمایشات در ظروف ۱۰۰۰ میلی لیتر و در دمای حدود ۲۰ درجه سانتی گراد انجام گردید. بطری های آزمایش یک لیتری با آب بندی و شیر مناسب جهت نمونه گیری از گاز و محلول آماده شد (شکل ۲). تمام بطری ها در مدت زمان آزمایش در محیط تاریک نگهداری می شدند. قابل ذکر است که قبل از شروع آزمایش ها شرایط بی هوازی برای تمام هاضم ها پس از آب گیری فراهم شد. جهت بی هوازی سازی بطری ها در ابتدا هوای موجود در بطری با فشردن آن خالی شده و سپس گاز نیتروژن به جای آن در بطری ها تزریق گردید.

مقدار pH جهت تولید بهینه متان در محدوده ۷ تنظیم شد و ۷۵۰ میلی لیتر از حجم بطری ها پر شد. با توجه به پیشینه پژوهش مقدار مواد جامد کل^۱ در حدود ۹٪ تنظیم شد و جهت تغییر نسبت کربن به نیتروژن مواد دیگری اضافه نشد تا نتیجه آزمایشات براساس عملکرد واقعی برگ درخت نخل با حداقل اختلالات انجام شود. آزمایشات در مدت زمان ۶۰ روز بود و هر سه روز داده برداری انجام می شد. آزمایشات دو بار تکرار شده و داده ها با طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی در SPSS 22 تحلیل شد. همچنین جهت آزمون تجزیه واریانس از آزمون دانکن استفاده شد.



شکل ۲. قسمتی از هاضم های آزمایش تولید بیوگاز

¹ Total Solids (TS)

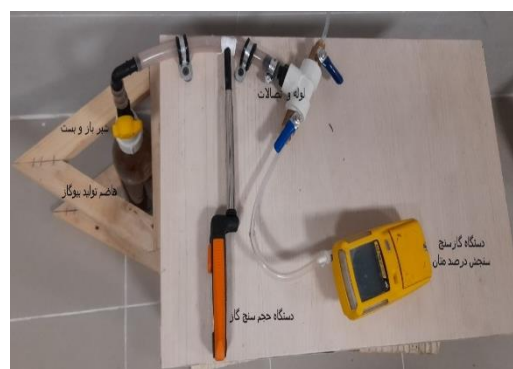
همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود در آزمایشات پیش‌فراوری اسیدی در برخی تیمارها از روزهای اول تا روز ۲۵ روند تولید بیوگاز صعودی بوده است و تقریباً از روز ۲۵ تا ۴۵ روند ثابت در مقدار حداکثر در تولید طی شده است و پس از آن روند تولید بیوگاز حالت نزولی به خود گرفته است. حداکثر مقدار تولید روزانه بیوگاز در برخی تیمارها مانند A3B1 و A3B2 حدود ۵۴۰ میلی‌لیتر در لیتر رسیده است، در برخی مانند A4B1 و A4B2 به حداکثر ۴۳۰ میلی‌لیتر در لیتر و در بقیه تیمارها به ۳۵۰ میلی‌لیتر در لیتر رسیده است که حدود ۲۰۰ میلی‌لیتر در لیتر از حداکثر بیوگاز تولید شده کمتر می‌باشد.

شکل ۵ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار تولید بیوگاز روزانه در تیمارهای پیش‌فراوری شده با گاز ازن به حداکثر مقدار ۴۴۰ میلی‌لیتر در لیتر رسیده است که از حداکثر مقادیر پیش‌فراوری شده با اسید ۱۰۰ میلی‌لیتر در لیتر کمتر است. مقایسه‌ی تولید روزانه بیوگاز در دو روش پیش‌فراوری به‌خوبی نشان می‌دهد که تیمارهای پیش‌فراوری شده با ازن تقریباً در پانزده روز اول با شیب کمتری بیوگاز تولید کرده‌اند و در هفته‌های بعدی در برخی از تیمارها با همین شیب ملایم و در برخی از تیمارها مانند O3M1، O3M2، O2M1 و O2M2 تا روز ۲۴ با شیب زیادی به حداکثر تولید بیوگاز رسیده‌ایم.

نکته قابل توجه آن است که در پیش‌فراوری با اسید در برخی از تیمارها از روز ۲۵ تا ۴۵ یعنی به مدت ۲۰ روز حداکثر مقدار بیوگاز در حدود ۵۵۰ میلی‌لیتر در لیتر تولید شده و بعد از آن روند نزولی آغاز گردیده است، اما در پیش‌فراوری با ازن در طول تنها چند روز (روز ۲۱ تا ۲۴) مقدار تولید بیوگاز به حداکثر رسیده و سپس دوباره روند نزولی شروع شده است. تولید تجمعی بیوگاز در پیش‌فراوری اسیدی نشان می‌دهد (شکل ۶) که تقریباً در تمامی تیمارها در طول ۲۰ روز اول تولید بیوگاز با شیب کمتر و سپس از روز ۲۱ تا ۵۶ با شیب نسبتاً زیادی تولید ادامه داشته است.

با پیش‌فراوری ازن در دو تیمار O2M1 و O2M2 از روز ۴۰ به بعد هم در تولید روزانه و هم در تجمعی بیوگاز (شکل ۷) افت زیادی مشاهده شد که یکی از دلایل آن می‌تواند کاهش pH هاضم باشد که در جای خود بحث می‌شود. مقایسه نمودارهای تولید تجمعی بیوگاز نکات جالبی را مشخص

جهت سنجش درصد متان در بیوگاز از دستگاه گازسنج BW MAX XT II و جهت سنجش حجم بیوگاز تولید شده از دستگاه حجم‌سنج گاز مدل Testoo 1100 استفاده شد (شکل ۳). این دو دستگاه با لوله‌ی مناسب به بطری هاضم متصل شده و داده‌ها یادداشت گردید. همچنین جهت اندازه‌گیری تغییرات pH از pH سنج دستی مدل هانا (کشور ارمنستان) استفاده شد. آزمایشات مقدار مواد جامد کل و مواد جامد فرار^۱ بر طبق استاندارد آب و فاضلاب شماره 2540 B, E (۱۳) انجام شد.



شکل ۳. سامانه اندازه‌گیری حجم بیوگاز و درصد متان تولید شده

یافته‌ها

ویژگی‌های شیمیایی چوب درخت خرما در مقایسه با کود دامی

کود دامی نیتروژن بیشتری نسبت به مواد لیگنوسلولزی دارد و در بسیاری پژوهش‌ها برای افزایش نسبت کربن به نیتروژن همراه با مواد لیگنوسلولزی به کار می‌رود (۱۴). با توجه به داده‌های به‌دست آمده در جدول ۱ چوب درخت خرما در مقایسه با کود دامی کربن بالاتر و نیتروژن کمتری دارد. با توجه به این‌که منابع بسیاری نسبت مطلوب کربن به نیتروژن را ۲۰ تا ۳۰ به یک ذکر کرده‌اند (۱۵)، تصمیم گرفتیم که مقدار بیوگاز تولیدی از چوب درخت خرما را بدون افزودن کود دامی مورد آزمایش انجام دهیم. همچنین مشخص است که درصد TS چوب درخت خرما بیشتر از کود دامی و درصد VS پایین‌تر از آن می‌باشد.

اثر روش پیش‌فراوری اسید رقیق و ازن بر تولید بیوگاز و متان

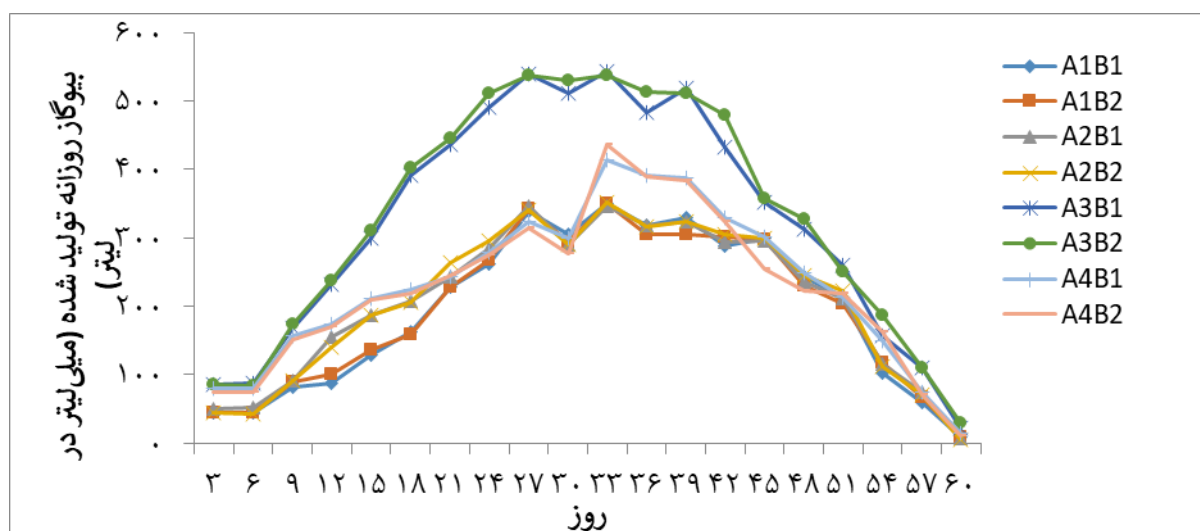
^۱ Volatile Solids (VS)

۵۰٪ بیشتر است. حداقل تولید تجمعی بیوگاز پس از شصت روز در پیش‌فرآوری اسیدی ۳۸۰۰ میلی‌لیتر در لیتر و در پیش‌فرآوری ازن ۲۵۰۰ میلی‌لیتر در لیتر می‌باشد که نشان می‌دهد پیش‌فرآوری نامناسب چه با اسید یا ازن نتیجه چشمگیری در تولید بیوگاز در پی نخواهد داشت.

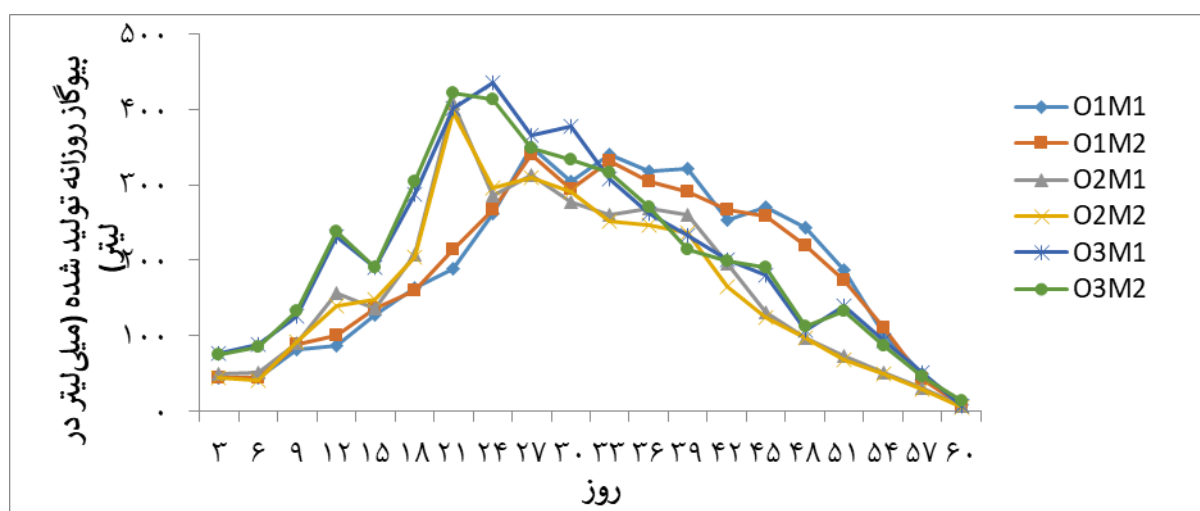
می‌کند. تقریباً در هر دو نمودار شامل تمامی تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید و ازن در بیست روز اول به حداکثر تولید تجمعی بیوگاز ۱۰۰۰ میلی‌لیتر در لیتر رسیده‌ایم با این حال از روز ۲۰ تا ۵۶ با پیش‌فرآوری ازن به حداکثر تولید تجمعی مقدار ۴۰۰۰ میلی‌لیتر در لیتر و با پیش‌فرآوری اسیدی به تولید مقدار ۶۰۰۰ میلی‌لیتر در لیتر بیوگاز رسیده‌ایم که

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی برگ درخت خرما و کود دامی

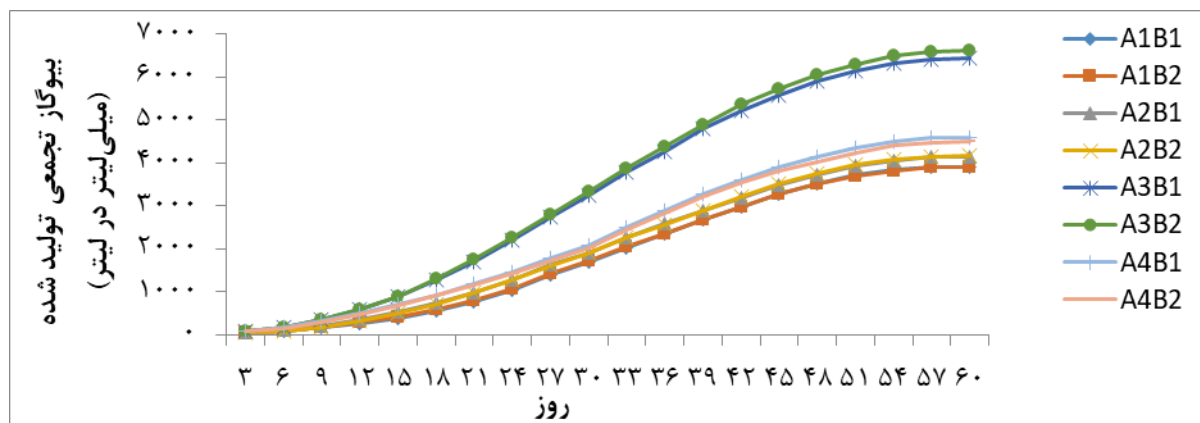
پارامتر	مواد جامد کل (%)	مواد جامد فرار (%)	رطوبت (%)	کربن (%)	نیتروژن (%)	نسبت کربن به نیتروژن
چوب درخت خرما	۸۶/۸	۷۵/۳	۱۳/۲	۵۴/۶	۲/۵	۲۱/۸:۱
کود دامی	۷۲/۳	۸۱/۵	۲۸/۸	۳۳/۲	۱/۲	۲۷/۷:۱



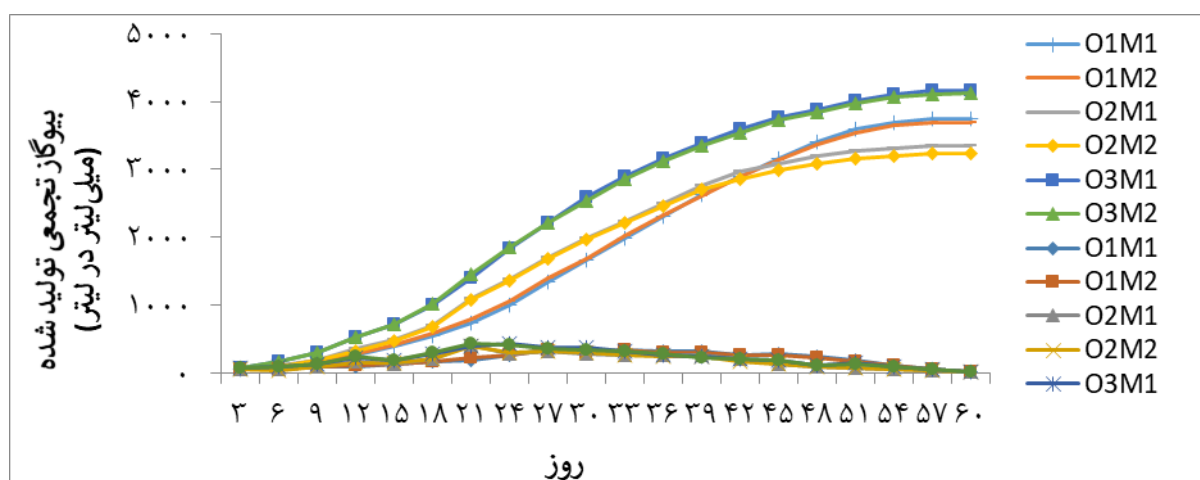
شکل ۴. تولید روزانه بیوگاز از تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید (A درصد اسید و B زمان پیش‌فرآوری)



شکل ۵. تولید روزانه بیوگاز از تیمارهای پیش‌فرآوری شده با ازن (O زمان ازن زنی و M رطوبت مواد)



شکل ۶. تولید تجمعی بیوگاز از تیمارهای پیش‌فراوری شده با اسید (A درصد اسید و B زمان پیش‌فراوری)



شکل ۷. تولید تجمعی بیوگاز از تیمارهای پیش‌فراوری شده با ازن (O زمان ازن زنی و M رطوبت مواد)

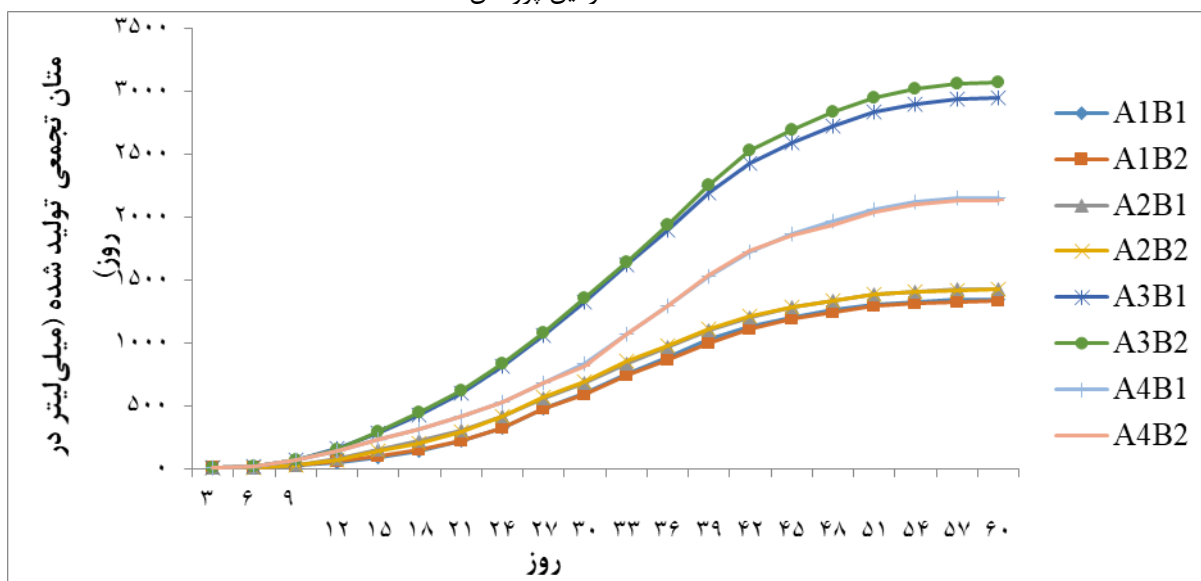
بود. در یک پژوهش اثر اسید سولفوریک در تولید بیوگاز از ساقه ذرت کاملاً برعکس بوده و با افزایش درصد اسید مقدار تولید بیوگاز کاهش یافت (۱۶). در این پژوهش نیز از غلظت ۱٪ به ۱/۵٪ اسید، مقدار بیوگاز کاهش یافت.

در نمونه‌های پیش‌فراوری شده با ازن مقدار بیوگاز تجمعی تولید شده نسبت به نمونه شاهد افزایش چشمگیری نداشته است (حدود ۱۵٪). اما مقدار متان تجمعی بیشتر بوده و از ۱۰۴۳ میلی‌لیتر در لیتر در نمونه شاهد به ۱۵۰۰ میلی‌لیتر در لیتر (تیمار O3M2) رسیده که نشانگر تولید ۵۰۰ میلی‌لیتر در لیتر متان بیشتر و ۵۰٪ افزایش پس از پیش‌فراوری با ازن می‌باشد (شکل ۹). برخی پژوهش‌های گذشته نشان از افزایش بیوگاز و متان تولید شده پس از پیش‌فراوری با ازن می‌باشند. یک مطالعه نشان داد که پیش‌فراوری لجن بی‌هوازی با ازن ۱۰۲ درصد تولید متان را افزایش داد (۱۷). پژوهش دیگری نشان داد که بازده تولید بیوگاز از ترکیبات آلی زیستی در مقایسه با حالت کنترل، در

در تیمارهای پیش‌فراوری با ازن مقدار تولید متان از روز ۲۱ به بعد با شیب نسبتاً زیادی نزولی شد و در فاصله‌ی زمانی ده روز از مقدار ۲۳۰ میلی‌لیتر در لیتر به ۱۳۰ میلی‌لیتر در لیتر رسید. در صورتی‌که مشابه همین روند در تیمارهای با پیش‌فراوری اسیدی از روز ۴۰ به بعد رخ داده است، به این معنی که هاضم‌های پیش‌فراوری شده با اسید با فاصله زمانی دو برابر بیشتر به تولید بیوگاز و متان ادامه داده‌اند.

در تیمارهای پیش‌فراوری شده با اسید مقدار بیوگاز تجمعی تولید شده در تیمارهای A3B1 و A3B2 به ۶۶۰۰ میلی‌لیتر در لیتر و در تیمار شاهد (A1B1 و A1B2) به ۳۹۰۰ میلی‌لیتر در لیتر رسیده است که تفاوت حدود ۶۰ درصدی را نشان می‌دهد. اما مقدار متان تجمعی تولید شده در همین تیمارها ۳۰۷۰ میلی‌لیتر در لیتر در مقابل ۱۳۴۰ میلی‌لیتر در لیتر که حدود ۲/۳ برابر بوده (شکل ۸) و بسیار چشمگیر است و نشان می‌دهد که نمونه بدون پیش‌فراوری ممکن است به تولید بیوگاز منجر شود اما احتمالاً حاوی متان زیادی نخواهد

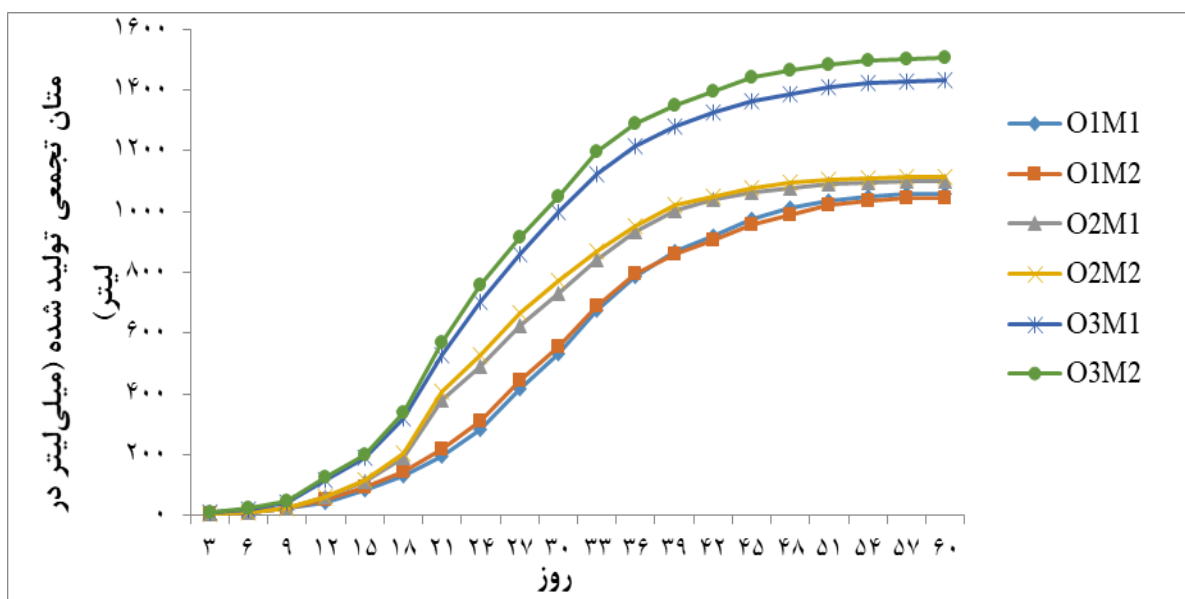
یک دوره هضم بی‌هوازی ۲۵ روزه، با پیش‌فرآوری مافوق صوت ۳۲٪ و با ازن‌زنی ۵۲/۹٪ افزایش یافت که تقریباً مشابه اثر ازن در این پژوهش است (۱۸).



شکل ۸. تولید تجمعی متان از تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید (A درصد اسید و B زمان پیش‌فرآوری)

می‌باشد، اما در نمودار بیوگاز تجمعی مشخص است که مثلاً در سطح ۱/۵ درصد اسید نمودار در حالت برخورد با خط ۵/۰ درصد اسید می‌باشد و به همین سبب آزمون دانکن اثر آن را معنی‌دار نشان می‌دهد. همچنین تجزیه‌ی واریانس پیش‌فرآوری ازن نشان می‌دهد که عامل رطوبت مواد (M) در تولید بیوگاز تجمعی به‌تنهایی معنی‌دار نبوده اما در تولید متان تجمعی تولیدشده اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ دارد (جدول ۲).

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد عامل زمان پیش‌فرآوری اسیدی (B) در تولید بیوگاز تجمعی اثر معنی‌داری در سطح ۹۹٪ داشته اما در مقدار متان تجمعی تولید شده اثر معنی‌داری نداشته است (جدول ۲). در اینجا نمودار سطوح اصلی این عامل به‌عنوان نمونه آورده می‌شود (شکل ۱۰). نمودار سطوح عامل زمان پیش‌فرآوری اسیدی در تولید متان تجمعی نشان می‌دهد وقتی از سمت ۴۰ به ۸۰ دقیقه می‌رسیم در تمامی سطوح درصد اسید تغییرات نمودار تقریباً خطی



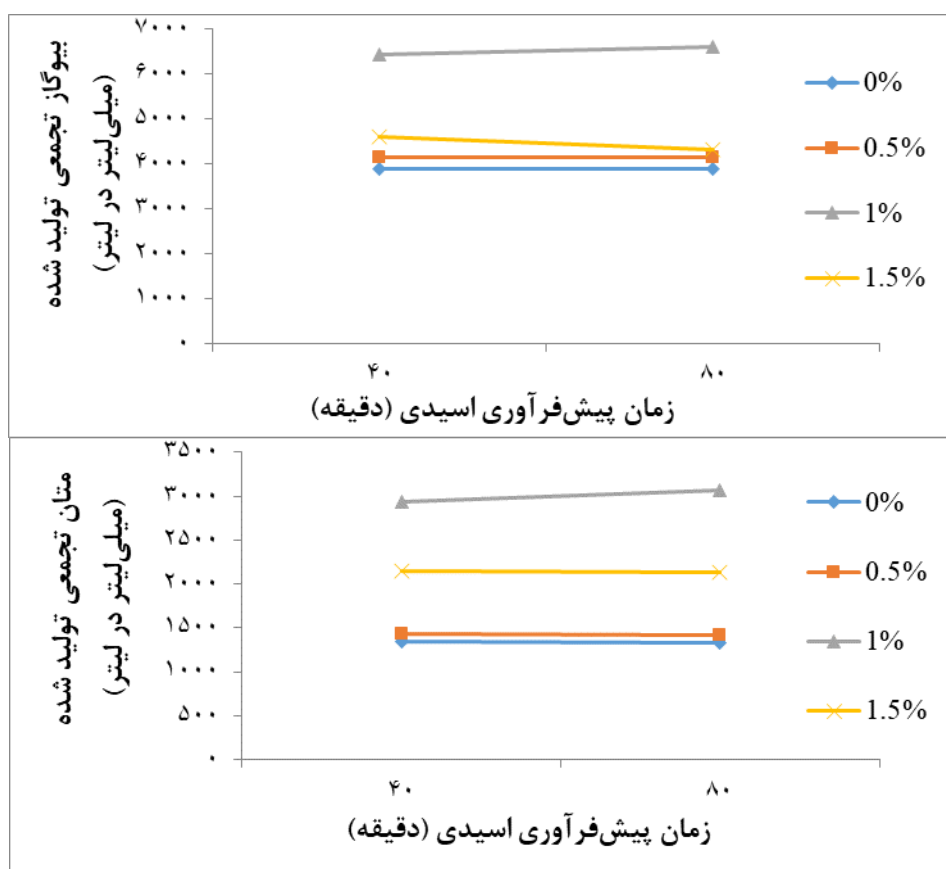
شکل ۹. تولید تجمعی متان از تیمارهای پیش‌فرآوری شده با ازن (O زمان ازن زنی و M رطوبت مواد)

جدول ۲. نتایج آزمون دانکن در عوامل مورد آزمایش تولید بیوگاز از برگ درخت خرما

پیش فراوری	منبع تغییر	موارد آزمایش شده				
		بیوگاز تجمعی (میلی لیتر در لیتر)	متان تجمعی (میلی لیتر در لیتر)	pH نهایی	TS نهایی	VS نهایی
پیش فراوری اسیدی	درصد اسید (A)	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ ns	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **
	زمان (B)	۰/۰۰۰ **	۰/۰۷۱ ns	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **
	A × B	۰/۰۰۷ **	۰/۰۰۵ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۱۱ *
پیش فراوری ازن	زمان ازن زنی (O)	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۱۲ *	۰/۰۰۰ **
	رطوبت مواد (M)	۰/۰۷۸ ns	۰/۰۰۰ **	۰/۰۶۷ ns	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **
	O × M	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **	۰/۰۰۰ **

ns: تفاوت معنی دار نیست، * تفاوت معنی دار در سطح ۰/۰۵، ** تفاوت معنی دار در سطح ۰/۰۱

نمودار سطوح عامل‌ها (شکل ۱۰) به خوبی نشان می‌دهد که در مقدار بیوگاز تجمعی تولید شده در غلظت ۱٪ اسید از بقیه غلظت‌ها با فاصله بیشتری به تولید بیوگاز ختم شده است. اما در رابطه با تولید متان تجمعی علاوه بر این که غلظت ۱٪ بالاتر از بقیه بوده، غلظت ۱/۵٪ نیز به متان تجمعی بیشتری نسبت



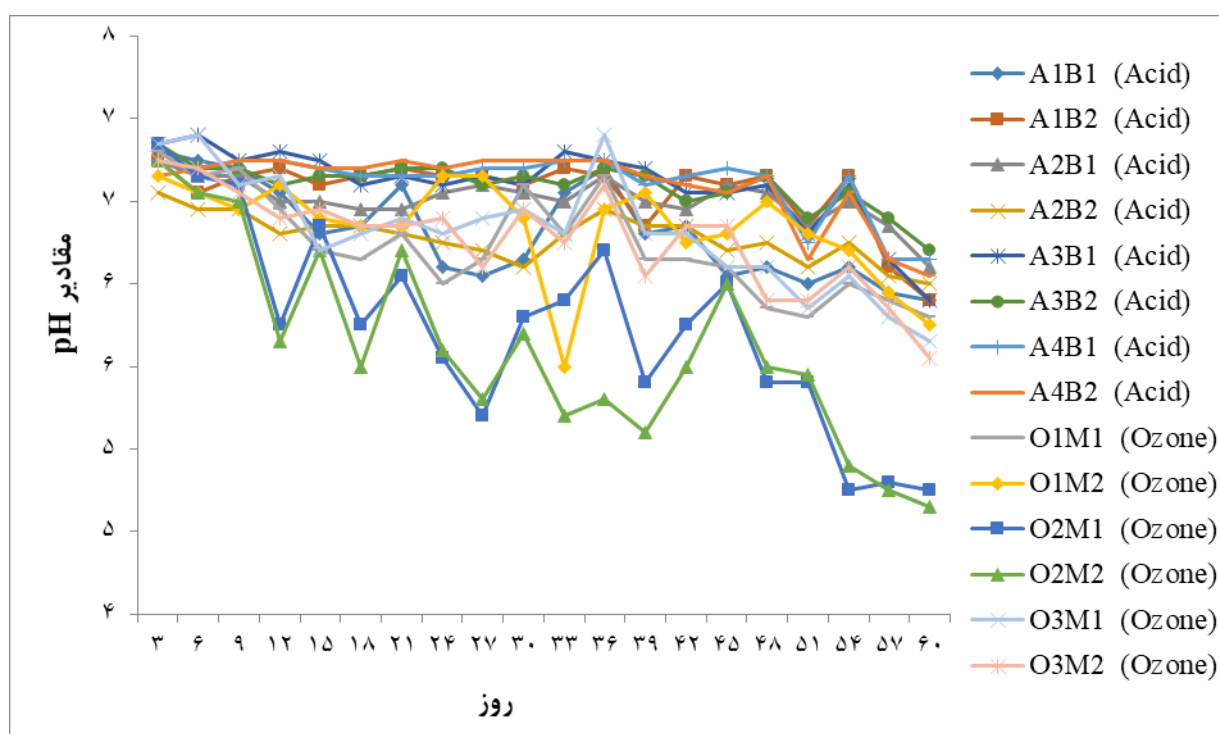
شکل ۱۰. اثر سطوح اصلی زمان پیش‌فرآوری اسیدی (۴۰ و ۸۰ دقیقه) در بیوگاز (بالا) و متان (پایین) تجمعی تولید شده

که به‌نظر می‌رسد، به همین دلیل مهم به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر، روند تولید بیوگاز در فاصله روزهای ۲۰ تا ۴۰ در پیش‌فرآوری اسیدی در مقادیر حداکثر باقی مانده و در نهایت سبب تولید بیوگاز تجمعی بالایی شده است.

در بسیاری از پژوهش‌ها رابطه‌ی مستقیمی بین مقدار pH و تولید بیوگاز تولیدشده گزارش شده است. مثلاً گزارش کرده‌اند کاهش pH از ۶/۵ به ۵/۵ مقدار بیوگاز را تا ۵۰٪ کاهش داده است (۱۳) (۱۹). در این مطالعه نیز اتفاق مشابهی رخ داده است. مثلاً تیمارهای O2M1 و O2M2 در مقایسه با تیمارهای O3M1 و O3M2 تا روز ۳۰ از pH حدود ۷ به ۵/۷ رسیده و مقدار بیوگاز آن از ۲۳۰ میلی‌لیتر در لیتر به ۱۳۵ میلی‌لیتر در لیتر رسید که نشان می‌دهد حدود ۴۵٪ کاهش یافته است.

اثر pH بر مقدار تولید بیوگاز و متان

تطابق مقادیر pH با مقادیر بیوگاز و متان تولید شده در همان زمان در تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید نشان داد محدوده pH تقریباً تا روزهای آخر آزمایش مناسب تولید بیوگاز بوده است. به صورتی‌که pH نهایی در همه‌ی تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید از ۶ پایین‌تر نیامده است. با این حال در تیمارهای پیش‌فرآوری شده با ازن مقدار pH نهایی در برخی تیمارها مانند O2M1 و O2M2 از روز ۴۰ به بعد کاهش بیشتری داشته و تا پایان آزمایش به حدود ۴/۵ رسیده است (شکل ۱۱) و همین عامل سبب شده مقدار بیوگاز و متان تولید شده نیز در این تیمارها از روز ۴۰ تا روز ۶۰ با شیب نسبتاً زیادی نزولی شده است. در فاصله روزهای ۲۰ تا ۴۰ در تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید تغییرات pH در محدوده ۶ و در تیمارهای پیش‌فرآوری با ازن در محدوده ۵/۱ می‌باشد



شکل ۱۱. مقادیر pH روزانه مربوط به تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید (A درصد اسید و B زمان پیش‌فرآوری) و ازن (O) ازن‌زنی و M رطوبت مواد)

حداکثر ۵۲٪ بوده و مقدار کاهش VS حداقل ۲۳٪ و حداکثر ۳۱٪ بوده است.

داده‌ها نشان داد که در دو تیمار A3B1 و A3B2 که حداکثر تولید تجمعی بیوگاز و متان را داشتیم نیز حداکثر تولید بیوگاز و متان بر طبق مقدار TS و VS مصرف شده به‌دست آمده است. با این حال برخی از تیمارها مانند A2B2 که در آن

مقدار کاهش TS و VS در انتهای آزمایش تولید بیوگاز

مقدار TS و VS نهایی پس از اتمام دوره ۶۰ روزه تولید بیوگاز آزمایش شد تا برآورد شود که این دو پارامتر مهم چقدر کاهش یافته است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که در تیمارهای پیش‌فرآوری شده با اسید مقدار کاهش TS حداقل ۳۸٪ و

میلی لیتر در گرم VS نیز بیشتر مشابه یکدیگر هستند. جالب توجه است که عامل زمان ازن زنی در کاهش TS نیز به تنهایی اثر معنی داری نداشته است، اگرچه در بقیه موارد مانند بیوگاز و متان تجمعی تولید شده اثر معنی داری در سطح ۹۹٪ داشته است (جدول ۲). با این حال حداقل و حداکثر متان به دست آمده به ترتیب از تیمارهای O1M2 و O3M3 با مقادیر ۴۳ میلی لیتر در گرم VS و ۶۴ میلی لیتر در گرم VS می باشد که تفاوت ۵۰ درصدی را نشان می دهد.

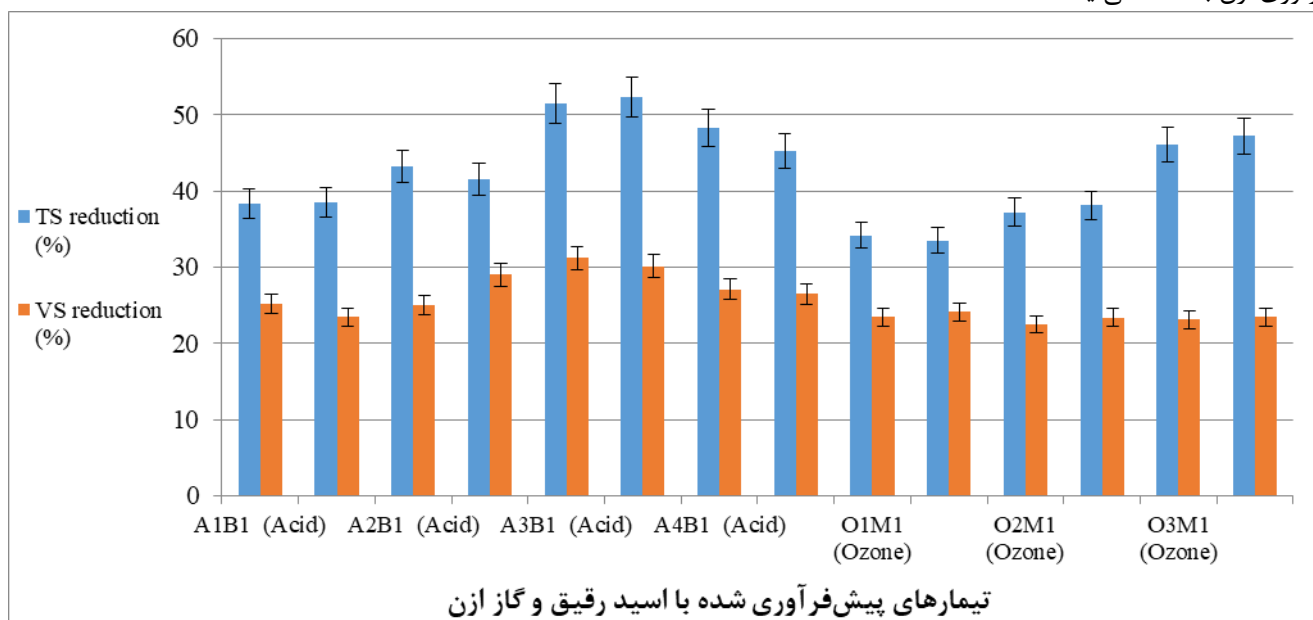
با توجه به جدول ۱ که برخی مشخصات شیمیایی برگ درخت خرما را نشان می دهد، ۷۵/۳ درصد از برگ درخت خرما مواد جامد فرار می باشد. به عبارت دیگر در هر تن برگ درخت خرما ۷۵۳ کیلوگرم مواد جامد فرار وجود دارد. بنابراین با پیش فراوری اسیدی مناسب می توان از هر تن برگ درخت خرما حدود ۱۳۱ متر مکعب متان خالص تولید نمود:

$$(174 \text{ ml CH}_4/\text{gr VS} \times 753000 \text{ gr VS/ton raw material}) = 131022000 \text{ ml CH}_4/\text{ton raw material} = 131022 \text{ L CH}_4/\text{ton raw material} = 131 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton raw material}$$

نسبت به تیمارهای A1B1 و A2B1 مقدار VS بیشتری کاهش یافته اما مقدار بیوگاز و متان به دست آمده بر هر میلی لیتر مواد جامد فرار کمتر می باشد که نشان می دهد در این تیمار VS مصرف شده منجر به تولید بیوگاز و متان نشده و به جای آن محصولات جانبی دیگر تولید شده است. این تیمار جزء تیمارهایی با حداقل pH نهایی ۵/۹ بوده که نشان می دهد در روزهای آخر نیز مقداری اسید در هاضم وجود داشته است. به طور کلی هر چه مقدار TS و VS کاهش یابد بهتر است و نشان می دهد از حجم مواد موجود، کم شده و به تناسب آن از آلودگی های زیست محیطی آن نیز کاسته شده است (۱۴) (۲۰). مثلاً در رابطه با تولید بیوگاز از انواع پساب ها هر چه مقدار TS و VS کاهش یابد بهتر می باشد و سبب کاهش انواع آلودگی های زیست محیطی نیز می شود.

در تیمارهای پیش فراوری شده با ازن مقدار TS کاهش یافته متفاوت و مقدار VS کاهش یافته بسیار شبیه به یکدیگر بودند و به همین سبب در مقدار متان به دست آمده بر حسب

با محاسبات مشابه مشخص می شود که از هر تن برگ درخت خرما حدود ۴۸/۲ متر مکعب متان خالص از بهترین تیمار با پیش فراوری ازن به دست می آید.



شکل ۱۲. درصد TS و VS کاهش یافته مربوط به تیمارهای پیش فراوری شده با اسید رقیق (A درصد اسید و B زمان پیش فراوری) و گاز ازن (O زمان ازن زنی و M رطوبت مواد)

بحث

با توجه به این که شرایط دما و میزان pH و TS اولیه در تمامی تیمارها یکسان بوده، میزان تخریب پذیری مواد و سرعت هیدرولیز آن ها مشخص کننده ی سرعت فعالیت باکتری های مختلف می باشد. به طور کلی بیوگاز و متان تولید شده در برخی تیمارهای پیش فرآوری اسیدی مانند A3B1 و A3B2 نشان می دهد که مواد در دسترس باکتری ها بیشتر بوده است. هم چنین روند ثابت در تولید بیوگاز برای مدت زمان نسبتاً طولانی در پیش فرآوری اسیدی نشان می دهد که باکتری های متان ساز با مواد آلی در دسترس آن ها سازگاری خوبی پیدا کرده و به تناسب آن مدت زمان ثابت شدن تولید روزانه ی بیوگاز بیشتر شده و تا ۲۰ روز ادامه یافته است.

در مرحله ی متان سازی، باکتری های متانوژن که مسئول تولید متان هستند، فعالیت می کنند و pH بهینه برای این گروه از میکروارگانیسم ها معمولاً بین ۶/۵ تا ۷/۵ است (۱۵) و اگر pH محیط خارج از این محدوده قرار گیرد، می تواند به فعالیت میکروارگانیسم ها آسیب برساند و تولید بیوگاز را کاهش دهد. با در دسترس بودن مواد کافی و تناسب بین آن ها از مرحله هیدرولیز فعالیت باکتری های متان ساز به سادگی مختل نشده و در تعادل با باکتری های اسیدساز و استات ساز به کار خود ادامه می دهند.

افت و خیزها در مقدار pH نشان می دهد (شکل ۱۱) که در برخی از روزها رشد باکتری های متان زا افزایش یافته و با مصرف اسیدهای موجود در هاضم pH دوباره افزایش یافته و پس از آن با هیدرولیز و اسیدزایی دوباره اسید در محیط اضافه شده و بر باکتری های متان زا غلبه کرده است. زمانی که pH در حد متعادل افت و خیز دارد و عملکرد هاضم مختل نشود به این معنی است که تولید و مصرف اسید در شرایط بهینه پیش می رود. زمانی که در روزهای پایانی با pH پایین روند تولید بیوگاز متوقف می شود می تواند به دلیل تجمع مقدار اسید و عدم رشد باکتری های متان ساز باشد. عدم رشد باکتری های متان ساز به نوبه ی خود نشانگر موارد مختلفی می تواند باشد. احتمالاً اتمام مواد غذایی در دسترس یا عدم تعادل در مواد غذایی موجود مانند درصد کربن و نیتروژن یکی از دلایل این امر می تواند باشد. مثلاً اتمام کربن و وجود نیتروژن در محیط می تواند به تجمع نیتروژن آمونیاکی منجر شود که در غلظت بالا ایجاد سمیت کرده و عملکرد هاضم را مختل می کند. همان طور که قبلاً بحث شد نسبت کربن به

نیتروژن چوب درخت خرما ۲۱/۸:۱ بود و مواد اضافی جهت افزایش درصد کربن به کار برده نشد. این مورد نیاز به تحقیقات بیشتری در آینده دارد که مشخص شود آیا با افزایش درصد کربن تولید بیوگاز و متان ارتقا می یابد یا خیر. بیشترین کاهش در TS و VS غالباً در تیمارهایی مشاهده شد که تولید بیوگاز بیشتری داشته اند و در واقع حاوی مواد با تخریب پذیری زیستی بالاتری بوده اند. در برخی از تیمارها که TS و VS تا حدودی کاهش داشته اما در خروجی بیوگاز مشاهده نشده، به دلیل تولید محصولات جانبی مانند اسیدهای چرب فرار می باشد که در هاضم بی هوازی فرصت تبدیل به بیوگاز و متان را نیافته است.

بر طبق مقدار متان تجمعی تولید شده و مقدار VS کاهش یافته می توان گفت که با بهترین پیش فرآوری اسیدی (A3B2) می توان حدود ۳۷۴ میلی لیتر در گرم VS و ۱۷۳ میلی لیتر در گرم VS بیوگاز و متان خالص و با بهترین پیش فرآوری ازن (O3M2) می توان حدود ۱۷۵ میلی لیتر در گرم VS و ۶۴ میلی لیتر در گرم VS بیوگاز و متان خالص تولید کرد. قابل ذکر است که برخی پژوهش ها اثر اسیدازالیک و اسیداستیک را در پیش فرآوری مواد لیگنوسولوزی بهتر از اسیدسولفوریک نشان داده (۲۱) و برخی اثر پیش فرآوری قلیایی را نیز مثبت ارزیابی کرده اند (۲۲) که می توان در تحقیقات تکمیلی از این موارد نیز بهره برد.

در یک پژوهش مقدار بیوگاز تولید شده از بقایای درخت نخل با استفاده از پیش فرآوری قلیایی بررسی شد. اندازه ذرات ۲ تا ۵ میلی متر، نسبت کربن به نیتروژن ۳۰:۱، درجه حرارت هاضم ها ۴۰ °C و pH برابر ۷ در نظر گرفته شد. این پژوهش نشان داد که تولید بیوگاز از هفته اول شروع شده و تقریباً تا یازده هفته ادامه داشته است. بیشترین مقدار بیوگاز تولید شده در حدود ۳۴۲ میلی لیتر در گرم VS به دست آمد که مشابه حداکثر تولید بیوگاز در پژوهش حاضر می باشد. در این مطالعه نیز تیمار شاهد که بدون پیش فرآوری بوده به تولید بیوگاز چندانی منجر نشد. پس از اتمام آزمایشات مشخص شد که در حدود ۵۸٪ از مقدار مواد آلی کاسته شده است و در واقع تبدیل به بیوگاز شده است (۲۳).

در یک مطالعه ی هضم بی هوازی برگ های خشک شده ی نخل خرما ی الجزایری برای تولید بیوگاز بدون پیش فرآوری بررسی شد (۱). بازده نظری متان بین ۵۳۸-۴۹۹ میلی لیتر در گرم VS و بازده واقعی تولید بیوگاز به ۱۹۷ میلی لیتر در گرم VS

بررسی شود. همچنین می‌توان نسبت کربن به نیتروژن را در مقایسه با پژوهش حاضر بیشتر نمود و در دماهای گوناگون آزمایشات را تکرار کرد تا تغییرات ارزیابی شود.

یکی از موارد مهم که در جریان آزمایشات مشخص شد مقدار شوری چوب درخت خرما می‌باشد که علت آن آبیاری درخت با آب کمی شور بوده است و این عامل باعث شد هاضم بی‌هوازی تحت شرایط شوری کار کند. در این پژوهش مشخص شد که مقدار نمک به حدود ۱/۷ گرم در لیتر رسیده است. با توجه به اهمیت موضوع اثر این عامل در پژوهش جداگانه‌ای بررسی شده است و جهت انتشار آن اقدام خواهد شد.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از تمامی کسانی که در انجام این پروژه ما را یاری رسانده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع: پژوهش حاضر دارای تعارض منافع نمی‌باشد.
حمایت مالی: بودجه‌ی این پژوهش از محل هزینه‌ی شخصی به‌همراه گرنت مربوط به تز دانشجوی کارشناسی‌ارشد تأمین گردید.

ملاحظات اخلاقی: تاکید می‌شود تمامی نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی و عدم داده‌سازی یا تحریف داده‌ها در این مقاله رعایت شده است. همچنین هرگونه تضاد منافع مؤثر بر مقاله رد می‌شود.

سهم نویسندگان: این مقاله بخشی از تز کارشناسی‌ارشد با راهنمایی جناب آقای دکتر احسان هوشیار می‌باشد. ایده‌ی اولیه پژوهش و طراحی آزمایشات به‌عهده‌ی استاد راهنما و قسمت عملی کار، جمع‌آوری داده‌ها و نگارش مقاله بر عهده‌ی سرکار خانم مهندس مریم کشتانی جهرمی بوده است. در نهایت بازبینی و تکمیل تحلیل داده‌های به‌دست آمده با راهنمایی جناب آقای دکتر احسان هوشیار صورت گرفته است.

References

1. Djaafri M, Kalloum S, Soulimani AE, Khelafi M. Bioconversion of Dried Leaves from Algerian Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) to Biogas by Anaerobic Digestion. *International Journal of Engineering Research in Africa* 2019; 41: 131-144.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.41.131>
2. Pasciucco, F., Francini, G., Pecorini, I., Baccioli, A., Lombardi, L., Ferrari, L. Valorization of biogas from the anaerobic co-treatment of sewage sludge and organic

و تولید متان به ۱۳۰ میلی‌لیتر در گرم VS رسید. تجزیه‌پذیری زیستی ۲۹٪ و حذف اکسیژن خواهی شیمیایی تا ۷۷٪ حاصل شد که نشان‌دهنده پتانسیل برگ‌های نخل خرما به‌عنوان یک بستر مناسب برای تولید بیوگاز است. در تیمارهای بدون پیش‌فراوری در پژوهش حاضر به بیوگاز بیشتر (۲۶۲ میلی‌لیتر در گرم VS) و متان کمتری (۹۰ میلی‌لیتر در گرم VS) دست یافته‌ایم. رفیق و همکاران با پیش‌فراوری حرارتی-شیمیایی کود دامی و لجن فاضلاب حدود ۴۰-۵ میلی‌لیتر در گرم VS بیوگاز به‌دست آوردند و رابطه‌ی معنی‌داری بین مقدار مواد جامد فرار مصرف‌شده و تولید متان گزارش کردند (۲۴). شو و همکاران با پیش‌فراوری حرارتی-قلیایی لجن فاضلاب نیز به حدود ۴۴ میلی‌لیتر در گرم VS بیوگاز رسیدند، اما رابطه‌ی معنی‌داری بین مصرف مواد جامد فرار و مقدار بیوگاز به‌دست نیامد (۲۵). با این‌حال تمامی پژوهش‌ها در این مورد که با مصرف درست مواد جامد فرار تولید بیوگاز و متان بیشتری حاصل می‌شود توافق دارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پیش‌فراوری برگ درخت خرما با گاز ازن و اسیدسولفوریک رقیق در تولید بیوگاز و متان بررسی شد. داده‌ها نشان داد با غلظت ۱٪ اسید و زمان‌های ۴۰ دقیقه یا ۸۰ دقیقه پیش‌فراوری می‌توان به بیشترین مقدار تولید بیوگاز تجمعی تا ۶۶۰۰ میلی‌لیتر در لیتر رسید که ۶۰٪ بیشتر از تیمار بدون پیش‌فراوری می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که با همین پیش‌فراوری می‌توان به حدود ۳۰۰۰ میلی‌لیتر در لیتر متان خالص دست یافت که ۲/۳ برابر تیمار بدون پیش‌فراوری بوده و اهمیت فرآیند پیش‌فراوری را نمایان می‌سازد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اثر دیگر اسیدها و قلیاها نیز در پیش‌فراوری چوب درخت خرما waste: Life cycle assessment and life cycle costing of different recovery strategies. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 401, 136762.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136762>

3. Chao CCT, Krueger RR. The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): Overview of biology, uses, and cultivation. *HortScience* 2007; 42: 1077-1082.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1077>

4. Grobelak, A., Bień, B., Sławczyk, D., & Bień, J. Conditioning Biomass for Biogas Plants: Innovative Pre-Treatment and Digestate Valorization Techniques to Enhance Soil Health and Fertility. *Sustainability*, 2025; 17(8), 3289. <https://doi.org/10.3390/su17083289>
5. Zin El-Abedin, T., Rezk, H. A., Kassem, A. S., Hemeda, S. G., & Omara, A. I. Effect of ultrasonic pretreatment of cow manure on biogas production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 2024; 42(1), 113-128.
6. Taherdanak M, Zilouei H. Karimi K. The influence of dilute sulfuric acid pretreatment on biogas production from wheat plant. *International Journal of Green Energy* 2016; 13(11): 1129-1134. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1175356>
7. Syaichurrozi I, Villta PK, Nabilah N, Rusdi R. Effect of sulfuric acid pretreatment on biogas production from *Salvinia molesta*. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2019; 7(1): 102857. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102857>
8. Hassaan MA, El Nemr A, Elkatory MR, Eleryan A, Ragab S, El Sikaily A, Pantaleo A. Enhancement of Biogas Production from Macroalgae *Ulva latuca* via Ozonation Pretreatment. *Energies* 2021; 14(6): 1703. <https://doi.org/10.3390/en14061703>
9. Hodaiei M, Ghasemi S, Khosravi A, Vossoughi M. Effect of the ozonation pretreatment on biogas production from waste activated sludge of Tehran wastewater treatment plant. *Biomass & Bioenergy* 2021; 152: 106198. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106198>
10. Silva Jose D, Tawai A, Divakaran D, Sriariyanun M, Phakeenuya V, Cheng YS, Tantayotai P. Influence of Acetic Acid Pretreatment and its Residue on Bioethanol and Biogas Production from Water Hyacinth. *Applied Science and Engineering Progress* 2024; 17(3):1-13.
11. Mahmoodi-Eshkaftaki M, Houshyar E. Biogas recirculation technology: Effect on biogas purification, slurry characteristics, microbial activity and energy consumption. *Environmental Technology & Innovation* 2020; 19: 100867. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100867>
12. Shitophyta, L. M., Cahyaningtyas, Z. L., Syifa, N. A., & Chusna, F. M. A. Various Types of Acids on Pretreatment of Corn Stover for Enhancing Biogas Yield. *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, 2022; 7(2), 275. <https://doi.org/10.31544/jtera.v7.i2.2022.275-280>
13. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd ed. American Public Health Association. 2017; Washington DC
14. Chinwendu D, Sunkanmi F, Joshua O, Blessing O. Investigating the Synergistic Effect of Temperature and pH Dynamics on Biogas Yield from Lignocellulosic Biomass Codigested with Cow dung. *Journal of Advances in Microbiology* 2024; 24(12): 139-162. <https://doi.org/10.9734/jamb/2024/v24i12879>
15. Nugraha WD, Keumala CF, Matin HHA. The Effect of Acid Pre-Treatment using Acetic Acid and Nitric Acid in The Production of Biogas from Rice Husk during Solid State Anaerobic Digestion (SS-AD) 2018; 31: 01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183101006>
16. Tian Y, Zhang H, Mi X, Wang L, Zhang L, Ai Y. Research on anaerobic digestion of corn stover enhanced by dilute acid pretreatment: Mechanism study and potential utilization in practical application. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2016; 8(2): 023103. <https://doi.org/10.1063/1.4945570>
17. Liu Y, Wang X, Chang C, Li X, Zhang D. Reuse of Digestate from Anaerobic Digestion of Organic Waste: Enhancement of Biogas Production Using Ozonation. *Environmental Engineering Science* 2024;

- 41(3): 120-129. <https://doi.org/10.1089/ees.2023.0238>
18. Le TM, Vo P T, Do TA, Tran LT, Truong HT, Le TTX, Chen YH, Chang CC, Chang CY, Tran QT, Thanh T, Do MV. Effect of Assisted Ultrasonication and Ozone Pretreatments on Sludge Characteristics and Yield of Biogas Production 2019; 7(10): 743. <https://doi.org/10.3390/pr7100743>
19. Ali HA, Faraj JJ, Hussien FM. Effect of pH on biogas production during anaerobic digestion. Journal of the University of Shanghai for Science and Technology 2021; 23(08): 224-231. <https://doi.org/10.51201/JUSST/21/08369>
20. Ahmadi Pirlou M, Mesri Gundoshmian T. Evaluating the Effect of Alkaline Pretreatment on Improvement of Biomethane Production from Anaerobic Digestion of Mixed Municipal Waste and Sewage Sludge. Iranian Journal of Research in Environmental Health. 2021; 7(1): 53-66.
21. Jankovičová B, Hutňan M, Nagy Czölderová M, Hencelová K, Imreová Z. Comparison of acid and alkaline pre-treatment of lignocellulosic materials for biogas production. CAAS Agricultural Journals. 2022; 68(4): 195-204. <https://doi.org/10.17221/421/2021-PSE>
22. Wicaksono A, Rahmawan A, Abdul Matin HH, Wardani LGK, Kusworo TD, Sumardiono S. The effect of pretreatment using sodium hydroxide and acetic acid to biogas production from rice straw waste 2017; 101: 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710102011>
23. Al-Juhaimi FY, Hamad SH, Al-Ahaideb IS, Al-Otaibi MM, Ghafoor K, Abbasi T, Abbasi SA. Biogas Production through the Anaerobic Digestion of Date Palm Tree Wastes - Process Optimization. Bioresources 2014; 9(2): 3323-3333. <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3323-3333>
24. Rafique R, Poulsen TG, Nizami AS, Asam ZZ, Murphy JD, Kiely G. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. Energy 2010; 35: 4556-61. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.011>
25. Xu J, Yuan H, Lin J. Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to enhance anaerobic biogas production. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2014; 45(5): 2531-36 <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.05.029>