

Improving Anaerobic Fermentation of Agricultural Wastes Using Ultrasonic Pretreatment to Increase Biohydrogen Production: Study of the Metabolic Pathway of Reactions

M. Mahmoodi-Eshkaftaki¹, A. Lotfalian-Dehkordi², H. Khafajeh^{1*}, S. H. Bahram Shabahrami¹

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, Jahrom, Fars, Iran

2- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(*- Corresponding Author Email: khafajeh@jahromu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98121.1477>

Introduction

The increasing demand for sustainable and renewable energy sources has intensified research on bioenergy production from agricultural wastes. Anaerobic digestion is a widely applied biological process for converting organic residues into valuable gaseous fuels such as biohydrogen and biomethane. However, the efficiency of this process is often limited by the complex structure of lignocellulosic biomass and the slow hydrolysis step, which acts as a rate-limiting factor. Therefore, various pretreatment techniques have been proposed to enhance substrate biodegradability and improve gas yields. Among physical pretreatment methods, ultrasonic pretreatment has attracted significant attention due to its ability to disrupt cell walls, reduce particle size, and enhance solubilisation of organic matter through cavitation effects. Despite numerous studies on biogas enhancement using ultrasonic pretreatment, limited research has simultaneously investigated its effect on biohydrogen production, gas composition (H_2 , CH_4 , CO , and H_2S), and the associated metabolic pathways for different agricultural residues. Accordingly, the main objective of this study was to evaluate the impact of ultrasonic pretreatment on the anaerobic digestion performance of selected agricultural wastes, including corn residues, potato waste, and banana waste. In addition to gas production performance, particular emphasis was placed on analysing changes in metabolic pathways and alcohol formation to better understand the mechanisms governing hydrogen and methane generation.

Materials and Methods

In this study three types of agricultural wastes, namely corn residues, potato waste, and banana waste, were used as feedstocks. The substrates were mixed with animal manure and water to provide appropriate microbial inoculation and moisture content. The prepared mixtures were mechanically stirred at 500 rpm for 10 minutes to ensure homogeneity. Ultrasonic pretreatment was applied using an ultrasonic device operating at 300 W for 5 minutes. Both pretreated and untreated samples were then subjected to anaerobic digestion under controlled conditions. Total solids (TS) and volatile solids (VS) were measured to characterise the substrates before digestion. During the anaerobic digestion process, the composition of the produced gases, including hydrogen (H_2), methane (CH_4), carbon monoxide (CO), and hydrogen sulfide (H_2S), was monitored. In addition, total alcohol concentration (ALC) was measured to assess shifts in fermentation pathways. The obtained data were analysed to compare the performance of ultrasonic pretreatment across different feedstocks and to evaluate its influence on metabolic reactions.

Results and Discussion

The results demonstrated that the effect of ultrasonic pretreatment on gas production strongly depended on the type of agricultural waste. For corn residues, ultrasonic pretreatment significantly enhanced biohydrogen production, increasing hydrogen concentration from approximately 2,585 ppm to 3,900 ppm. Methane production also showed a moderate increase, rising from about 104,000 ppm to 107,000 ppm. These improvements can be attributed to enhanced solubilisation of organic matter and improved accessibility of fermentable substrates. In contrast, potato waste exhibited decreased hydrogen and methane production following ultrasonic pretreatment. This behaviour suggests that excessive disruption of the substrate structure may have promoted alternative metabolic pathways unfavourable for gas generation. Banana waste showed a substantial percentage increase in hydrogen production after ultrasonic pretreatment, although its effect on methane production was less pronounced. Across all substrates, ultrasonic pretreatment led to an increase in carbon monoxide concentration and a noticeable reduction in hydrogen sulfide, which is considered beneficial due to the corrosive nature of H_2S . Metabolic pathway analysis revealed that ultrasonic pretreatment, particularly in banana and corn wastes, promoted pathways

leading to alcohol production, such as ethanol and methanol formation. This shift explains the observed reduction or stagnation in hydrogen and methane production during later stages of digestion, as substrates were partially diverted toward solventogenic reactions.

Conclusion

The results of this study indicate that ultrasonic pretreatment can be an effective approach for improving the performance of anaerobic digestion; however, its effectiveness strongly depends on the type of substrate used. Among the investigated agricultural residues, corn waste demonstrated the most favourable response to ultrasonic pretreatment, showing improvements in both hydrogen and methane production. Banana peel also exhibited a noticeable increase in hydrogen generation after pretreatment, whereas potato waste showed a less favourable response and did not benefit significantly from the ultrasonic treatment. In addition, the variations observed in gas composition and alcohol production suggest that changes in microbial metabolic pathways play an important role in determining the outcomes of pretreatment processes. Overall, these findings suggest that ultrasonic pretreatment has considerable potential for enhancing bioenergy recovery from agricultural wastes, provided that pretreatment conditions are carefully optimised according to the characteristics of each substrate.

Keywords: Agricultural waste, Anaerobic digestion, Biogas, Ultrasonic pretreatment, Volatile particles

بهبود تخمیر بی‌هوازی ضایعات کشاورزی با استفاده از پیش‌تیمار فراصوت به منظور افزایش تولید بیوهیدروژن: مطالعه مسیر متابولیکی واکنش‌ها

محمود محمودی اشکفتکی^۱، امین لطفعلیان دهکردی^۲، حمید خفاجه^{۱*}، سیده حدیثه بهرام شابهرامی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

چکیده

تولید بیوهیدروژن از زیست‌توده‌های کشاورزی به‌عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، تأثیر پیش‌تیمار فراصوت بر بهبود تخمیر بی‌هوازی و افزایش تولید بیوهیدروژن از برخی ضایعات کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، سه نوع زیست‌توده شامل ضایعات ذرت، ضایعات سیب‌زمینی و پوست موز به‌عنوان بستر تخمیر مورد استفاده قرار گرفتند و نمونه‌ها تحت پیش‌تیمار فراصوت به مدت ۵ دقیقه در توان ۳۰۰ وات قرار گرفتند. نتایج نشان داد استفاده از پیش‌تیمار فراصوت به‌طور کلی موجب افزایش ۵۰/۸۷ درصدی تولید بیوهیدروژن نسبت به نمونه‌های بدون پیش‌تیمار شد. همچنین بررسی روند تجمعی گازهای تولیدی نشان داد که اعمال این پیش‌تیمار موجب افزایش ۲/۹ درصدی تولید متان گردید. در میان زیست‌توده‌های مورد بررسی، پوست موز بیشترین تأثیرپذیری از پیش‌تیمار فراصوت را نشان داد، به‌طوری‌که میزان تولید بیوهیدروژن در این بستر حدود ۵۰ درصد افزایش یافت. در مقابل، تولید متان در برخی تیمارها اندکی کاهش نشان داد که می‌تواند ناشی از افزایش ترکیبات آنتی‌باکتریال نظیر تانن‌ها و فنول‌ها در محیط تخمیر در اثر اعمال پیش‌تیمار فراصوت باشد. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای بهبود کارایی تخمیر بی‌هوازی و افزایش تولید بیوهیدروژن از ضایعات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، پیش‌تیمار فراصوت، ذرات فرار، ضایعات کشاورزی، هضم بی‌هوازی

مقدمه

افزایش تقاضای انرژی، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها، ضرورت توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک را بیش از پیش آشکار کرده است. در این میان، زیست‌توده و پسماندهای آلی به‌دلیل فراوانی، قابلیت تجزیه‌پذیری و امکان تبدیل به حامل‌های انرژی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. پسماندهای کشاورزی در صورت مدیریت نامناسب می‌توانند موجب آلودگی خاک، آب و هوا شوند؛ اما از سوی دیگر، به‌عنوان منابعی ارزان، در دسترس و تجدیدپذیر برای تولید انرژی زیستی قابل استفاده هستند (Mahmoodi-Eshkaftaki, Ebrahimi, & Ghasemi-Pirbaloti, 2017). مطالعات انجام‌شده در زمینه تبدیل پسماندهای کشاورزی به بیوگاز نیز نشان داده‌اند که استفاده از این مواد می‌تواند ضمن کاهش خطرات زیست‌محیطی، به توسعه سوخت‌های غیرفسیلی و مدیریت پایدار پسماند کمک کند. تقی‌نژاد و همکاران (Taghinazhad, Abdi, & Adl, 2018) در

تحقیقی به تولید بیوگاز از بقایای کشاورزی، بر ظرفیت این منابع در تولید انرژی زیستی و کاهش بار آلاینده‌ها تأکید کردند. هضم بی‌هوازی یکی از فناوری‌های مؤثر و پایدار برای تبدیل مواد آلی به انرژی است که طی آن ترکیبات آلی در نبود اکسیژن و با فعالیت مجموعه‌ای از میکروارگانیسم‌ها به محصولات گازی و مایع تبدیل می‌شوند. این فرایند افزون بر تولید بیوگاز، می‌تواند در مراحل اسیدزایی و تخمیر تاریک، به تولید بیوهیدروژن نیز منجر شود. بیوهیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک، به‌دلیل ارزش حرارتی بالا و عدم تولید آلاینده‌های کربنی در هنگام مصرف، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با این حال، بازده تولید بیوهیدروژن از پسماندهای آلی به عوامل مختلفی از جمله نوع خوراک، ترکیب مواد آلی، شرایط pH، دما، نوع میکروارگانیسم‌ها و قابلیت تجزیه‌پذیری زیست‌توده وابسته است. از این رو، انتخاب خوراک مناسب و بهبود دسترسی میکروبی به ترکیبات قابل تخمیر، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش کارایی فرایند محسوب می‌شود (Sami, Akram, & ...)

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Khafajeh@jahromu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98121.1477>

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه جهرم، جهرم، فارس، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(Sharifi, 2021). بخش قبل توجهی از ضایعات کشاورزی دارای ساختار لیگنوسلولزی است که عمدتاً از سلولز، همی‌سلولز و لیگنین تشکیل شده است. این ساختار پیچیده و متراکم، دسترسی آسان میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها به کربوهیدرات‌های قابل تخمیر را محدود می‌کند و در نتیجه می‌تواند سرعت هیدرولیز و تولید گاز را کاهش دهد. علاوه بر این، برخی پسماندهای کشاورزی ممکن است حاوی ترکیبات بازدارنده‌ای مانند ترکیبات فنولی، تانن‌ها یا سایر مواد ضدباکتریایی باشند که فعالیت میکروبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین، یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از ضایعات کشاورزی برای تولید بیوهیدروژن، افزایش قابلیت هضم زیستی و کاهش محدودیت‌های ساختاری و شیمیایی این مواد است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نوع پسماند و ترکیب آن می‌تواند اثر چشمگیری بر عملکرد هضم بی‌هوازی داشته باشد؛ به‌طوری‌که صفری و عبدی (Safari & Abdi, 2016) در بررسی بقایای کلزا و گندم در ترکیب با کود دامی، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها از نظر تولید متان گزارش کردند و نشان دادند که بقایای کلزا نسبت به گندم پتانسیل بیشتری برای تولید متان دارد. به‌منظور افزایش بازده تبدیل زیست‌توده به انرژی، استفاده از پیش‌تیمارهای فیزیکی، شیمیایی، حرارتی و زیستی پیش از هضم بی‌هوازی مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی این پیش‌تیمارها، تخریب ساختار سلولزی، افزایش سطح تماس، آزادسازی مواد آلی محلول و بهبود انتقال جرم در محیط تخمیر است. در مطالعات مرتبط با هضم بی‌هوازی گزارش شده است که پیش‌تیمار می‌تواند با شکستن غشای سلولزی و افزایش انحلال‌پذیری ترکیبات آلی، عملکرد فرایند را بهبود دهد. کمالی و همکاران (Kamali, Abdi, Rohani, Abdollahpour, & Ebrahimi, 2022) در پژوهشی درباره بهینه‌سازی تولید بیوگاز از بخش آلی پسماند شهری تحت پیش‌تیمار حرارتی بیان کردند که هضم بی‌هوازی به‌دلیل بازایی انرژی و مواد مغذی از پسماند، روشی پایدار برای مدیریت مواد آلی است و اعمال پیش‌تیمار می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش کارایی تولید بیوگاز باشد. با این وجود، شدت و شرایط پیش‌تیمار باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که ضمن افزایش قابلیت تجزیه‌پذیری، از تشکیل یا آزادسازی ترکیبات بازدارنده و کاهش فعالیت میکروبی جلوگیری شود. در میان روش‌های مختلف پیش‌تیمار، فراصوت به‌عنوان یک روش فیزیکی مؤثر، سریع و نسبتاً قابل کنترل شناخته می‌شود. این روش با ایجاد پدیده کاویتاسیون، تشکیل و فروپاشی حباب‌های ریز، افزایش تنش‌های برشی و ایجاد نقاط موضعی با فشار و دمای بالا، می‌تواند ساختار سلولزی و بافتی مواد آلی را تخریب کرده و ترکیبات قابل تخمیر را در دسترس میکروارگانیسم‌ها قرار دهد. در نتیجه، پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند مرحله هیدرولیز را که معمولاً یکی از مراحل محدودکننده در هضم بی‌هوازی زیست‌توده‌های پیچیده است، تسریع کند و زمینه افزایش تولید بیوهیدروژن را فراهم سازد. با

وجود این، اثرگذاری این روش به نوع پسماند، ترکیب شیمیایی آن، شدت انرژی، زمان اعمال پیش‌تیمار و شرایط تخمیر وابسته است. از این‌رو، بررسی اثر پیش‌تیمار فراصوت بر انواع مختلف ضایعات کشاورزی می‌تواند به شناخت بهتر عملکرد این فناوری در بهبود تولید انرژی زیستی کمک کند (Mahmoodi-Eshkaftaki, Rafiee, & Mahmoudi, 2023). مطالعات انجام‌شده درباره کاربرد فراصوت در فرایندهای زیستی نشان داده‌اند که توان صوتی، زمان اعمال فراصوت و ترکیب سوبسترا از عوامل تعیین‌کننده در تجزیه‌پذیری ساختار لیگنوسلولزی، حذف آلاینده‌ها و بهبود تولید بیوهیدروژن هستند. محمودی اشکفتکی و غنی (Mahmoodi-Eshkaftaki & Ghani, 2022) با بررسی اثر توان و زمان فراصوت و همچنین ترکیب سوبسترا شامل ضایعات گوجه‌فرنگی و کود گاوی، نشان دادند که بهینه‌سازی شرایط پیش‌تیمار می‌تواند موجب افزایش حذف جامدات کل، جامدات فرار، لیگنین، سلولز و همی‌سلولز شده و در نهایت تولید بیوهیدروژن را نسبت به سیستم شاهد افزایش دهد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، اثر پیش‌تیمار فراصوت بر افزایش تجزیه‌پذیری ضایعات گوجه‌فرنگی و بهبود تولید بیوهیدروژن و بیومتان بررسی شد و نتایج نشان داد که عملکرد فرایند به‌شدت تابع توان صوتی، زمان فراصوت و نسبت اختلاط سوبسترا است. با وجود اثرگذاری پیش‌تیمارها بر بهبود تولید سوخت‌های زیستی، اعمال آن‌ها همواره منجر به افزایش بازده فرایند نمی‌شود و در برخی شرایط می‌تواند اثرات بازدارنده ایجاد کند. در طی پیش‌تیمار و تخریب ساختارهای سلولزی و میکروسکوپی مواد، امکان آزادسازی ترکیبات فنولی و سایر مواد بازدارنده در محیط تخمیر افزایش می‌یابد. این ترکیبات می‌توانند فعالیت میکروبی را کاهش داده و در نتیجه تولید سوخت زیستی را محدود کنند (Kim, 2018; Mahmoudi-Eshkaftaki & Ghani, 2022; Wang et al., 2017). بنابراین، انتخاب شرایط مناسب پیش‌تیمار و بررسی پاسخ هر نوع پسماند به این فرایند، برای دستیابی به بیشترین بازده تولید بیوهیدروژن ضروری است. با وجود پژوهش‌های انجام‌شده درباره هضم بی‌هوازی و پیش‌تیمارهای مختلف، هنوز اطلاعات محدودی درباره مقایسه پاسخ ضایعات کشاورزی با ترکیب‌های متفاوت نسبت به پیش‌تیمار فراصوت وجود دارد. به‌ویژه، در بسیاری از مطالعات تمرکز اصلی بر مقدار گاز تولیدی بوده و تغییرات مسیرهای متابولیکی و ارتباط آن‌ها با تولید بیوهیدروژن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر پیش‌تیمار فراصوت بر بهبود تخمیر بی‌هوازی سه نوع ضایعات کشاورزی شامل ضایعات ذرت، ضایعات سیب‌زمینی و پوست موز انجام شد. در این مطالعه، ضمن مقایسه عملکرد نمونه‌های پیش‌تیمار شده و شاهد، تغییرات تولید بیوهیدروژن و بیوگاز و نیز مسیرهای متابولیکی احتمالی واکنش‌ها مورد بررسی قرار گرفت تا امکان استفاده مؤثرتر از پسماندهای کشاورزی در تولید انرژی زیستی ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

دستگاه pH سنج اندازه‌گیری شد. در تمام نمونه‌ها، مقدار pH با اضافه کردن اسید سولفوریک به عدد ۵ تنظیم گردید؛ این مقدار pH، مقدار بهینه pH جهت فعالیت باکتری‌های هیدرولیزکننده است. در این مطالعه، اندازه‌گیری pH با استفاده از pH متر رومیزی مدل HI2210 انجام شد و عملیات همزدن نمونه‌ها به کمک همزن مکانیکی با حداکثر سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه صورت گرفت. در مرحله بعد، نمونه‌ها به دو گروه، گروه اول تحت پیش‌تیمار فراصوت و گروه دوم بدون پیش‌تیمار فراصوت (شاهد) تقسیم‌بندی شدند. پیش‌تیمار فراصوت به مدت ۵ دقیقه در توان ۳۰۰ وات با استفاده از دستگاه حمام فراصوت یک لیتری ELMA آلمان مدل S10H دارای فرکانس ۳۷ کیلوهرتز در دمای ۷۰ درجه سلسیوس انجام شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، تمرکز اصلی بر ارزیابی پتانسیل تولید انرژی از بسترهای مختلف کشاورزی تحت یک شرایط ثابت پیش‌تیمار بوده است. لذا، شرایط عملیاتی فراصوت (۳۰۰ وات، ۵ دقیقه و دمای ۷۰ درجه سلسیوس) بر اساس پیشینه پژوهش و مطالعات مقدماتی به‌عنوان یک نقطه مرجع انتخاب شد و تعیین شرایط بهینه در دامنه متغیرهای مختلف، در اهداف فعلی این مطالعه نبوده است. آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام شد.

جدول ۱- ضایعات استفاده‌شده در آزمایش‌های هضم بی‌هوازی

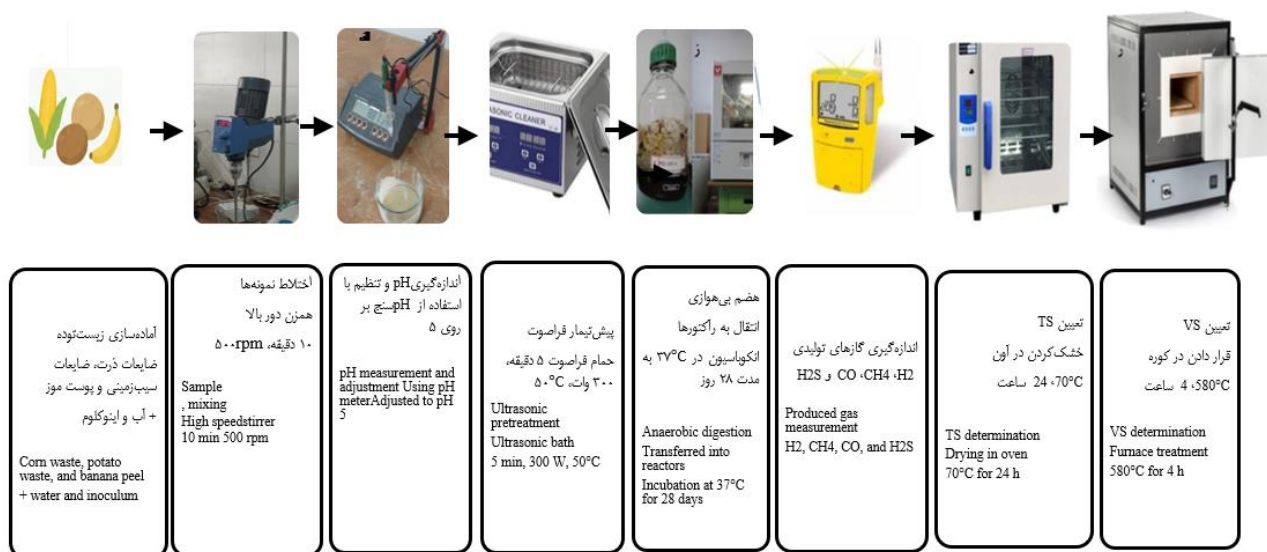
Table 1- Wastes used in the anaerobic digestion experiments

نوع ضایعات	اسیدیته اولیه	آب	اینوکولوم	پیش‌ماده
Waste type	Initial pH	Water (g)	Inoculum (g)	Substrate (g)
ضایعات ذرت	5	120	20	40
Corn waste				
ضایعات سیب‌زمینی	5.5	120	20	40
Potato waste				
پوست موز	5.6	120	20	40
Banana peel				

۲۸ روز در دمای ۳۷ سلسیوس تحت هضم بی‌هوازی قرار گرفتند. ترکیبات بیوگاز تولیدشده از راکتورهای بی‌هوازی شامل مقادیر H_2 ، CH_4 و CO به‌صورت هفته‌ای اندازه‌گیری شد. H_2 توسط دستگاه گازسنج چندمتغیره برند GMI مدل GT43 در محدوده دمای اتاق اندازه‌گیری شد و ترکیبات CH_4 ، CO و H_2S توسط دستگاه گازسنج چندمتغیره مدل BW در دمای اتاق اندازه‌گیری شد (Mahmoodi-Eshkaftaki et al., 2023). میزان الکل کل (ALC) تولیدشده در حین واکنش‌ها با استفاده از دستگاه رفراکتومتر اندازه‌گیری شد. مراحل اجرایی پژوهش شامل آماده‌سازی زیست‌توده، پیش‌تیمار و هضم بی‌هوازی در شکل ۱ به‌صورت شماتیک خلاصه شده است.

سه نوع زیست‌توده شامل ضایعات ذرت، ضایعات سیب‌زمینی و پوست موز به‌عنوان ماده مغذی اصلی مورد استفاده قرار گرفتند. هر یک از این مواد به‌صورت جداگانه با مقدار مشخصی آب و اینوکولوم مخلوط شدند. در این مطالعه، کل مواد جامد (Total Solids, TS) و مواد جامد فرار (Volatile Solids, VS) به‌ترتیب به‌عنوان شاخص‌های بیانگر میزان کل مواد جامد موجود در نمونه و بخش آلی قابل تجزیه زیستی آن در نظر گرفته شدند. مقادیر TS، VS و pH اینوکولوم به‌ترتیب برابر با ۴٪، ۸۶٪ و ۲/۵ بود. اینوکولوم از راکتورهای فعال در آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه جهرم استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه‌های دانشگاه جهرم، واقع در استان فارس، ایران انجام گرفت. نسبت‌های ترکیب نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. پس از اختلاط، مخلوط‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۵۰۰ دور بر دقیقه هم‌خوردند تا ساختار یکنواختی برای مواد ایجاد شود. پس از تهیه مخلوط، میزان اسیدیته (pH) هر نمونه با استفاده از

به‌منظور اندازه‌گیری TS و VS، مقدار ۸ گرم از هر کدام از نمونه‌ها جدا شد. مابقی نمونه‌ها در راکتورهای بی‌هوازی ریخته شد و فرایند تولید بیوگاز بررسی شد. نمونه‌هایی که برای محاسبه TS جدا شد به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس درون دستگاه آون قرار گرفت، تا نمونه‌ها کاملاً خشک شود (Mahmoodi-Eshkaftaki et al., 2023). بعد از خشک شدن نمونه‌ها، نمونه‌ها در بوتله چینی ریخته شده و داخل کوره در دمای ۵۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت قرارداده شد تا ذرات فرار نمونه‌ها تبخیر شده و خاکستر ته بوتله باقی بماند (Mahmoodi-Eshkaftaki & Rahmanian, 2020). نمونه‌های فاضلاب به‌دست‌آمده در راکتورهای بی‌هوازی به ابعاد ۵۰۰ میلی‌لیتر ریخته شدند و در آنکوباتور به مدت



شکل ۱- نمودار شماتیک مراحل آماده‌سازی زیست‌توده، پیش‌تیمار فراصوت، هضم بی‌هوازی و اندازه‌گیری گازهای تولیدی

Fig. 1. Schematic diagram of biomass preparation, ultrasonic pretreatment, anaerobic digestion, and measurement of the produced gases

نتایج و بحث

ویژگی‌های فاضلاب ورودی به راکتورها

بار آلوده آن فاضلاب بیشتر است و هر چه قدر VS یک فاضلاب بیشتر باشد، قابلیت تولید بیوگاز آن فاضلاب بیشتر می‌باشد. فاکتورهای TS و VS نمونه‌های فاضلاب‌های تهیه‌شده از هر پیش‌ماده در شرایط پیش‌تیمار فراصوت و بدون پیش‌تیمار اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

TS و VS از مهم‌ترین فاکتورهای مورد بررسی در تصفیه فاضلاب‌ها می‌باشند. هر چه قدر TS یک فاضلاب بیشتر باشد معمولاً

جدول ۲- مقادیر TS و VS فاضلاب‌های تهیه‌شده از ضایعات مختلف تحت شرایط پیش‌تیمار و بدون پیش‌تیمار

Table 2- TS and VS values of wastewater prepared from different wastes under pretreatment and non-pretreatment conditions

نوع تیمار Treatment	نوع ضایعات Waste type	TS (%)	VS (%)
پیش‌تیمار فراصوت Ultrasonic pretreatment	ضایعات ذرت Corn waste	32.5	70.692
	ضایعات سیب‌زمینی Potato waste	30	52.500
	ضایعات موز Banana waste	10	86.250
شاهد Control	ضایعات ذرت Corn waste	32.5	71.461
	ضایعات سیب‌زمینی Potato waste	31.4	51.318
	ضایعات موز Banana waste	10	85.500

مقدار می‌باشد. این در حالی است که VS ضایعات موز از دو پیش‌ماده دیگر بیشتر می‌باشد. بالا بودن VS ضایعات ذرت و موز ظرفیت بالای

همانطور که از جدول ۲ مشخص است، TS ضایعات ذرت از ضایعات دیگر بیشتر می‌باشد و این فاکتور در ضایعات موز کمترین

زیست‌توده‌ها با اعمال متغیر فراصوت و بدون اعمال متغیر فراصوت نشان‌دهنده تأثیر مثبت و معنادار این متغیر بر بهبود عملکرد تخمیری و افزایش بازده تولید گازهای زیستی می‌باشد (Yang & Wang, 2019). استفاده از فراصوت در هر سه پیش‌ماده منجر به افزایش محسوس در تولید گاز H_2 و CH_4 گردید. این افزایش عمدتاً ناشی از تسهیل فرایند هیدرولیز، تخریب ساختار سلولی، و بهبود دسترسی باکتری‌ها به مواد قابل تخمیر بوده است (Mahmoodi-Eshkaftaki & Rahmanian-Koushkaki, 2020). اندازه‌گیری‌ها نشان داد هیدروژن در ضایعات در هفته‌های اول هضم بسیار بالا و به مرور کاهش یافته است.

این ضایعات در تبدیل به بیوگاز را نشان می‌دهد. بالا بودن TS و VS یک پیش‌ماده، قابلیت بالای آن در تبدیل به یک سوخت زیستی را نشان می‌دهد (Mahmoodi-Eshkaftaki & Rahmanian-Koushkaki, 2020).

آنالیز ترکیبات بیوگاز

ترکیبات بیوگاز ضایعات مختلف در یک دوره هضم ۲۸ روزه اندازه‌گیری شده و در جداول ۳ تا ۵ گزارش شده است. ترکیبات اندازه‌گیری شده شامل H_2 ، CH_4 ، منواکسید کربن CO و H_2S بودند که از نمونه‌های تحت پیش‌تیمار و نمونه شاهد اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری گازهای تولیدشده در فرایند تخمیر بی‌هوازی

جدول ۳- ترکیبات بیوگاز تولیدی از ضایعات ذرت تحت پیش‌تیمار فراصوت در مقایسه با نمونه‌های شاهد

Table 3- Biogas composition produced from corn waste under ultrasonic pretreatment compared with control samples

دوره هضم Digestion period	H_2 (ppm)	H_2S (ppm)	CH_4 (ppm)	CO (ppm)	ALC (%)	H_2 (ppm)	H_2S (ppm)	CH_4 (ppm)	CO (ppm)	ALC (%)
پیش‌تیمار فراصوت Ultrasonic pretreatment						شاهد Control				
هفته اول Week 1	1550	1	20000	62	2	65	3	22000	33	0
هفته دوم Week 2	2000	0	20000	0	10	390	0	22000	0	6
هفته سوم Week 3	250	0	25000	57	13	1350	0	20000	8	8
هفته چهارم Week 4	100	0	42000	73	13	780	10	40000	30	90

جدول ۴- ترکیبات بیوگاز تولیدی از ضایعات سیب‌زمینی تحت پیش‌تیمار فراصوت در مقایسه با نمونه شاهد

Table 4- Biogas composition produced from potato wastes under ultrasonic pretreatment compared with control sample

دوره هضم Digestion period	H_2 (ppm)	H_2S (ppm)	CH_4 (ppm)	CO (ppm)	ALC (%)	H_2 (ppm)	H_2S (ppm)	CH_4 (ppm)	CO (ppm)	ALC (%)
پیش‌تیمار فراصوت Ultrasonic pretreatment						شاهد Control				
هفته اول Week 1	20000	17	22000	491	0	400000	50000	30000	10	0
هفته دوم Week 2	450	51	20000	50	3	1700	51	20000	19	0
هفته سوم Week 3	1050	0	42000	80	6	65	3	50000	0	4
هفته چهارم Week 4	250	0	40000	100	4	10	0	40000	0	4

جدول ۵- ترکیبات بیوگاز تولیدی از ضایعات موز تحت پیش‌تیمار فراصوت در مقایسه با نمونه شاهد

Table 5- Biogas composition produced from banana waste under ultrasonic pretreatment compared with control sample

دوره هضم Digestion period	H ₂ (ppm)	H ₂ S (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO (ppm)	ALC (%)	H ₂ (ppm)	H ₂ S (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO (ppm)	ALC (%)
	پیش تیمار فراصوت Ultrasonic pretreatment					شاهد Control				
هفته اول Week 1	1200	0	20000	470	5	243	0	20000	100	3
هفته دوم Week 2	340	0	42000	100	8	50	0	30000	0	7
هفته سوم Week 3	250	0	35000	60	15	10	0	38000	0	14
هفته چهارم Week 4	50	0	10000	0	20	0	0	25000	0	11

می‌کند. آزادسازی ترکیبات آلی محلول در اثر این پیش تیمار، مواد مغذی بیشتری را در دسترس باکتری‌های هیدروژن‌وژن و متانوژن قرار می‌دهد. با این حال، تفاوت در میزان افزایش تولید بین بسترها (مانند افزایش چشمگیر در پوست موز) نشان‌دهنده واکنش متفاوت ساختارهای مختلف به انرژی فراصوت است. همچنین، باید در نظر داشت که در برخی تیمارها، آزادسازی همزمان ترکیبات بازدارنده مانند فنول‌ها و تانن‌ها ممکن است بر فعالیت متانوژن‌ها اثر منفی نسبی داشته باشد، هرچند که در این مطالعه به دلیل عدم اندازه‌گیری مستقیم متابولیت‌های میانی، این تحلیل‌ها به‌عنوان فرضیه‌های محتمل بر اساس تغییرات ترکیب گاز بیان می‌شوند. این نتایج با تحقیقات دیگر محققین همخوانی دارد (Mahmoodi-Eshkaftaki & Rahmanian-Koushkaki, 2020). در طول دوره آزمایش، اگرچه میزان هیدروژن و متان در بعضی هفته‌ها نوسان داشت، اما بازده کلی در نمونه‌های تحت پیش تیمار همواره بالاتر از گروه شاهد بود. بررسی ترکیبات سولفید هیدروژن و منواکسید کربن نشان داد، استفاده از پیش تیمار فراصوت موجب کاهش ترکیب مضر سولفید هیدروژن به‌صورت چشمگیر شد، اما موجب افزایش منواکسید کربن نیز شد. افزایش ترکیب منواکسید کربن به‌خاطر شکسته شدن ساختارهای کربوهیدرات و آزاد شدن کربن در محیط بوده که منجر به افزایش تولید متان و منواکسید کربن شده است. این نتایج با نتایج به‌دست آمده در تحقیقات دیگران همخوانی دارد (Kumar & Sharma, 2017; Mahmoodi-Eshkaftaki & Rahmanian-Koushkaki, 2020). نتایج آنالیز الکل در جدول ۳ نشان داد، با گذشت زمان تخمیر، تولید الکل افزایش یافته است. به‌طوری‌که الکل تولیدشده در هفته‌های سوم و چهارم افزایش چشمگیری داشت.

بر اساس داده‌های جدول ۴، بیشترین میزان تولید هیدروژن در نمونه‌های حاصل از ضایعات سیب‌زمینی در هفته نخست آزمایش و در شرایط شاهد (فاقد پیش تیمار فراصوت) معادل ۴۰۰۰۰ ppm ثبت

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۳، در گازهای حاصل از ضایعات ذرت، بیشترین غلظت هیدروژن در هفته دوم آزمایش و معادل ۲۰۰۰ ppm در شرایط پیش تیمار فراصوت ثبت گردید. مقدار در مقایسه با نمونه شاهد (فاقد پیش تیمار) چندین برابر افزایش نشان داده و بیانگر نقش مؤثر و تسریع‌کننده پیش تیمار فراصوت در فرایند تخمیر می‌باشد. بیشترین میزان تولید هیدروژن در نمونه‌های شاهد در هفته سوم به‌وجود آمد که نشان می‌دهد استفاده از پیش تیمار فراصوت توانسته فرایند هیدرولیز را سریع‌تر کند. این نتیجه با نتایج تحقیقات محمودی اشکفتکی و غنی (Mahmoodi-Eshkaftaki & Ghani, 2022) و محمودی اشکفتکی و همکاران (Mahmoodi-Eshkaftaki et al., 2023) همخوانی دارد. این نتایج نشان داد استفاده از پیش تیمار فراصوت به‌طور کلی میزان تولید هیدروژن را ۵۰/۸۷ درصد افزایش داده است. بررسی روند تولید متان از ضایعات نشان داد، میزان متان در نمونه‌های پیش تیمارشده حدود ۳۲۰۰۰ ppm و در هفته چهارم گزارش شد، در حالی‌که این مقدار در نمونه شاهد کمتر بود. بررسی تجمعی گازهای تولیدشده در ۲۸ روز نشان داد استفاده از پیش تیمار فراصوت به‌طور کلی موجب افزایش ۲/۹ درصدی تولید متان شد. این اختلاف حاکی از آن است که اعمال امواج فراصوت با تخریب ساختارهای سلولزی و همی سلولزی، موجب بهبود دسترسی میکروارگانیسم‌ها به ترکیبات کربوهیدراتی و در نتیجه افزایش کارایی فرایند هضم بیولوژیک می‌گردد. این افزایش در تولید بیوهیدروژن و متان را می‌توان از دیدگاه مکانیزمی به پدیده کاویتاسیون ناشی از فراصوت نسبت داد. امواج فراصوت با ایجاد حباب‌های میکروسکوپی و انفجار آن‌ها، فشارهای موضعی شدیدی ایجاد می‌کنند که منجر به شکستن ساختار پیچیده لیگنوسلولزی ضایعات کشاورزی (ذرت، سیب‌زمینی و پوست موز) می‌شود. این فرایند باعث کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح تماس در دسترس برای میکروارگانیسم‌ها می‌گردد که مستقیماً مرحله هیدرولیز را تسهیل

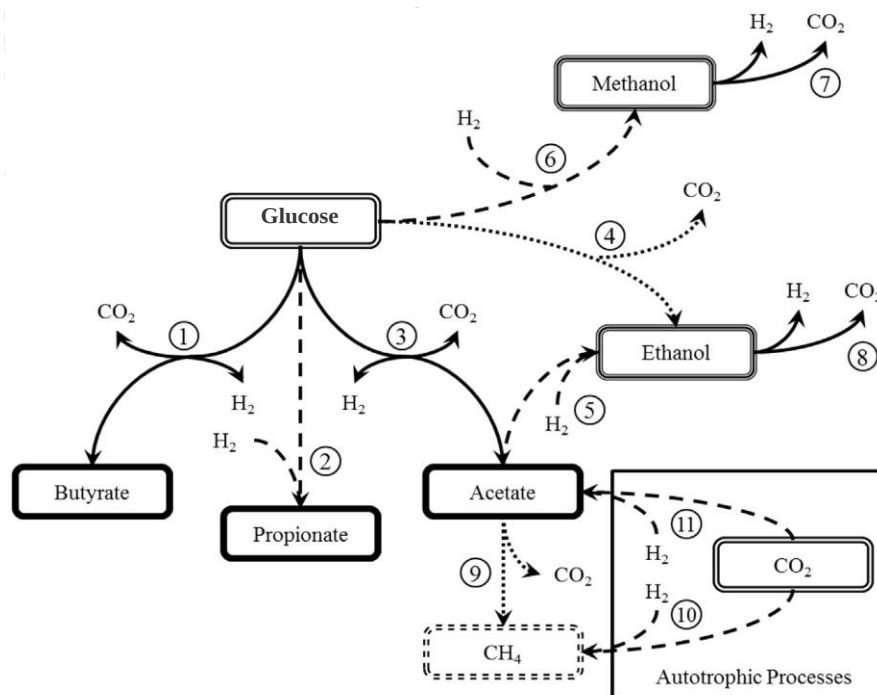
در ضایعات پوست موز باشد. به عبارت دیگر، اگرچه پیش تیمار توانست تولید هیدروژن را به طور محسوسی افزایش دهد، اما تأثیر آن بر فرایند تولید متان چندان قابل توجه نبود. به طور کلی نتایج نشان داد پیش تیمار فراصوت موجب افزایش ۵۰۰ درصد تولید هیدروژن در ترکیبات موز شده است؛ اما تولید متان را اندکی کاهش داده است. کاهش تولید متان می‌تولند ناشی از افزایش ترکیبات آنتی‌باکتریال مانند تانن‌ها و فنول‌ها در فاضلاب در اثر پیش تیمار فراصوت باشد (Mahmoodi-[Eshkaftaki & Ghani, 2022](#)). نتایج نشان داد ترکیبات منواکسیدکربن و سولفید هیدروژن در بیوگاز تولیدی از ضایعات موز اندک می‌باشد. البته پیش تیمار فراصوت موجب افزایش منواکسیدکربن در بیوگاز شده است که می‌تواند ناشی از آزاد شدن کربن در اثر شکستن ساختارهای سلولوزی و همی سلولوزی ضایعات موز باشد. طبق جدول ۵، تولید الکل با گذشت زمان تخمیر افزایش داشت، به طوری که در هفته سوم و چهارم به اوج خود رسیده است.

مسیرهای سوخت و ساز تبدیل بستر به بیوگاز

جهت تفسیر بهتر نتایج، ترکیبات به وجود آمده در طی واکنش بی‌هوازی بررسی شدند و معادلات شیمیایی آن‌ها مطالعه شد. با توجه به درصد ترکیبات قندی بالای موجود در ضایعات مورد مطالعه، گلوکز به عنوان اصلی‌ترین ترکیب مشترک بین هر سه ضایعات (بیشتر از ۸۰٪ کل) به عنوان ماده اصلی در تخمیر انتخاب شد و مسیرهای سوخت و ساز تبدیل گلوکز به بیوگاز، روابط استوکیومتری ترکیبات به وجود آمده حین واکنش‌ها و انرژی هر واکنش بررسی شدند. در شکل ۲ مسیرهای واکنش‌ها در تولید متان از گلوکز را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در دوره هضم بی‌هوازی، ترکیبات اسیدی حد واسطه از قبیل استات، پروپیونات و بوتیرات و ترکیبات الکلی از قبیل اتانول و متانول تولید می‌شود (Mockaitis *et al.*, 2020). همان‌طور که دیده می‌شود، هیدروژن ابتدا در مراحل اولیه هضم (مرحله هیدرولیز) تولید می‌شود و سپس برای ساخت ترکیبات جدید مصرف می‌شود. هیدروژن در تولید بوتیرات (مسیر ۱)، تولید استات (مسیر ۳)، تجزیه متانول (مسیر ۷) و تجزیه اتانول (مسیر ۸)، تولید می‌شود. در ضمن هیدروژن در تولید پروپیونات (مسیر ۲)، اتانول (مسیر ۵)، متانول (مسیر ۶)، متان‌سازی (مسیر ۱۰) و چرخش استات‌سازی (مسیر ۱۱) مصرف می‌گردد. مقدار تولید و مصرف هیدروژن از طریق روابط استوکیومتری موجود در جدول ۶ قابل بررسی خواهد بود.

گردید. این مقدار به طور معناداری بیشتر از نمونه‌های تحت پیش تیمار بود که مقادیر پایین‌تری از هیدروژن تولید کردند. با این حال، روند تولید هیدروژن در طول دوره آزمایش کاهش بود، به طوری که مقادیر ثبت شده پس از هفته اول به طور قابل توجهی افت داشت. چنین الگویی نشان می‌دهد که اگرچه سیب‌زمینی به دلیل محتوای بالای قندهای ساده و نشاسته در مراحل ابتدایی تخمیر قابلیت بالایی برای تولید هیدروژن دارد، اما این پتانسیل به سرعت کاهش یافته و پایداری فرایند محدود می‌گردد. از نظر تولید متان، بیشترین مقدار در شرایط شاهد حدود ۵۰۰۰ ppm مشاهده شد، در حالی که نمونه‌های تحت پیش تیمار فراصوت میزان کمتری از متان تولید کردند. این یافته می‌تواند بیانگر آن باشد که اعمال پیش تیمار فراصوت در مورد ضایعات سیب‌زمینی برخلاف ضایعات ذرت، اثر مثبتی بر بهبود فرایند متان‌زایی نداشته و حتی منجر به کاهش بازده تولید متان شده است. یکی از دلایل احتمالی این پدیده می‌تواند آزادسازی سریع ترکیبات بازدارنده ناشی از شکستن ساختارهای سلولی در اثر پیش تیمار باشد که کارایی میکروارگانیسم‌های هیدرولیزکننده و متانوژن را کاهش داده است (Kim, 2018). در ضمن پیش تیمار منجر به افزایش ترکیبات مضر بیوگاز مانند منواکسیدکربن شده است که دلیل اصلی آن می‌تواند آزاد شدن کربن در محیط فاضلاب باشد. پیش تیمار فراصوت توانسته سولفید هیدروژن را به شدت کاهش دهد و این اثر مثبتی بوده که پیش تیمار مذکور بر ضایعات سیب‌زمینی داشته است. تولید الکل در ضایعات سیب‌زمینی از هفته اول تا سوم رو به افزایش و با اوج گرفتن تولید متان کاهش یافت.

بر اساس داده‌های جدول ۵، در هفته نخست آزمایش غلظت هیدروژن در نمونه شاهد تنها ۲۴۳ ppm بود، در حالی که در نمونه تحت پیش تیمار فراصوت این مقدار به حدود ۱۲۰۰ ppm افزایش یافت. این تفاوت نشان‌دهنده تأثیر مثبت پیش تیمار در بهبود آزادسازی اجزای قابل تخمیر از ساختار پوست موز می‌باشد. وجود قندهای ساده و فیبرهای نیمه سلولوزی در پوست موز سبب می‌شود که با اعمال پیش تیمار فراصوت، دسترسی میکروارگانیسم‌ها به این ترکیبات تسهیل شده و بازده تولید هیدروژن در مراحل ابتدایی افزایش یابد. از نظر تولید متان، در هفته اول هر دو نمونه (شاهد و پیش تیمار) مقدار تقریباً یکسانی معادل ۲۰۰۰ ppm نشان دادند. با این حال، در هفته دوم روند تغییرات متان برخلاف هیدروژن بود؛ به طوری که میزان متان در نمونه پیش تیمار به حدود ۴۲۰۰ ppm رسید، در حالی که این مقدار در نمونه شاهد ۴۴۰۰ ppm ثبت شد. این اختلاف اندک می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر محدود پیش تیمار فراصوت بر بهبود متانوژن



شکل ۲- مسیرهای سوخت و ساز تبدیل گلوکز به بیوگاز (مسیرهای سوخت و ساز با عدد در کنار مسیرها نشان داده شده است)

Fig. 2. Metabolic pathways of glucose conversion to biogas (metabolic pathways are indicated by numbers adjacent to the pathways)

بود که ممکن است به‌خاطر تولید بیشتر اتانول و متانول در ضایعات ذرت به‌خاطر ترکیبات قندی بیشتر آن‌ها نسبت به ضایعات سیب‌زمینی و عدم شکست آن‌ها و تبدیل به هیدروژن و متان باشد (Wang et al., 2017). بررسی روند تولید الکل در سه ماده به‌خوبی این نتایج را توجیه می‌کند.

روند تولید متان در ضایعات ذرت و سیب‌زمینی در هفته‌های سوم و چهارم به مقدار بیشینه خود رسید، که دلیل اصلی آن ترکیبات هیدروکربنی بالای این پیش‌مواد می‌باشد که توسط فعالیت باکتری‌های هیدرولیزکننده، اسیدساز و استات‌ساز شکسته و در دسترس باکتری‌های متانوژن قرار داده که منجر به تولید بیشتر متان در هفته‌های سوم و چهارم شده است. این نتیجه با نتایج سایر محققین همخوانی دارد (Mahmoodi-Eshkaftaki & Rahmadian-Koushkaki, 2020; Yalcinkaya & Malina, 2015). در ضایعات موز تولید هیدروژن و متان در هفته‌های اول و دوم بالا و سپس کاهش یافته است که می‌تواند تجزیه‌پذیری بیشتر این ضایعات نسبت به دو ماده دیگر باشد. این بحث با کاهش روند تولید در هفته‌های بعدی قابل توجیه است. با وجود نتایج مثبت به‌دست آمده در بهبود تولید بیوهیدروژن و متان، باید توجه داشت که این یافته‌ها مربوط به شدت خاصی از پیش‌تیمار فراصوت (۳۰۰ وات و ۵ دقیقه) است. از آنجا که پاسخ بسترهای مختلف به انرژی فراصوت متفاوت است، عدم بررسی سطوح مختلف توان و زمان به‌عنوان یکی

همان‌طور که از جدول ۶ مشخص است، بیش‌ترین میزان تولید هیدروژن در مرحله تولید بوتیرات است که در حقیقت مرحله اسیدسازی در واکنش هضم بی‌هوازی است و معمولاً بین هفته اول و دوم از آغاز مرحله هضم اتفاق می‌افتد. این روند به‌خوبی در نتایج این تحقیق اتفاق افتاده است. به‌طوری‌که در هر سه پیش‌ماده در هفته اول و دوم بیش‌ترین میزان تولید هیدروژن تولید شد و به مرور میزان تولید هیدروژن کاهش یافت. انرژی گیبس در ۶ واکنش اول منفی است که نشان می‌دهد واکنش‌های اولیه مربوط به اسیدسازی و الکل‌سازی، به‌صورت خودکار اتفاق می‌افتد اما واکنش‌های مربوط به شکست اتانول و متانول، گرما نیاز دارد و در صورتی که شرایط فراهم نباشد اتفاق نمی‌افتد (Deshavath, Veeranki, & Goud, 2019). منفی‌ترین انرژی گیبس مربوط به تولید اتانول (مرحله ۴) است، بنابراین اگر شرایط تولید اتانول فراهم باشد واکنش در مواد به سمت تولید اتانول می‌رود و میزان تولید گاز کاهش می‌یابد (Tajmiriahi, Momayez, & Karimi, 2020). این نتیجه در بستر موز که ترکیبات قندی بالایی دارد نیز به‌خوبی دیده شد. دلیل اصلی این رویداد می‌تواند تولید اتانول و متانول و فراهم نبودن شرایط شکست اتانول و متانول به‌منظور تولید هیدروژن و پس از آن تولید متان باشد. مقایسه روند تولید متان در ضایعات ذرت و سیب‌زمینی هم نشان داد تولید متان در هفته‌های پایانی در ضایعات سیب‌زمینی بیشتر از ذرت

شود تا پتانسیل بیشینه این فناوری در مقیاس صنعتی بهتر ارزیابی گردد.

از محدودیت‌های مطالعه حاضر تلقی می‌شود. لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فراصوت به‌صورت چندمتغیره (مانند روش سطح پاسخ) برای هر بستر به‌طور مجزا انجام

جدول ۶- ترکیبات به‌وجودآمده در حین هضم مواد در رآکتور، روابط استوکیومتری مسیرهای سوخت و ساز و انرژی استاندارد گیبس مربوط به هر واکنش

Table 6- Compounds formed during substrate digestion in the reactor, stoichiometric relations of metabolic pathways, and standard Gibbs free energy associated with each reaction

مسیر واکنش Reaction pathway	فرایند بی‌هوازی Anaerobic process	انرژی گیبس Gibbs free energy (kJ mol ⁻¹)	روابط استوکیومتری Stoichiometric relation
1	بوتیرات‌زایی Butyrate formation	-224	$2C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow C_4H_8O_2 + 8CO_2 + 18H_2$
2	پروپیونات‌زایی Propionate formation	-473	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2C_3H_6O_2 + 2H_2O$
3	استات‌زایی Acetate formation	-100	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2C_2H_4O_2 + 2CO_2 + 4H_2$
4	حلال‌زایی اتانول (از گلوکز) Ethanol fermentation (from glucose)	-609	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$
5	حلال‌زایی اتانول (از استات) Ethanol formation (from acetate)	-37.8	$C_2H_4O_2 + 2H_2 \rightarrow C_2H_6O + H_2O$
6	حلال‌زایی متانول Anaerobic degradation of methanol	-86	$C_6H_{12}O_6 + 6H_2 \rightarrow 6CH_4O$
7	تجزیه بی‌هوازی متانول Anaerobic degradation of methanol	9.14	$CH_4O + H_2O \rightarrow CO_2 + 3H_2$
8	تجزیه بی‌هوازی اتانول Anaerobic degradation of ethanol	97.5	$C_2H_6O + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2$
9	متان‌زایی از استات Acetoclastic methanogenesis	-71	$C_2H_4O_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$
10	متانوژن‌زایی هیدروژنوتروفیک Hydrogenotrophic methanogenesis	-131	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
11	هموآستوژنز Homoacetogenesis	-59.7	$2CO_2 + 4H_2 \rightarrow C_2H_4O_2 + 2H_2O$

نتیجه‌گیری

میان زیست‌توده‌های بررسی‌شده، پوست موز بیشترین پاسخ را به پیش‌تیمار فراصوت نشان داد و تولید بیوهیدروژن در این بستر حدود ۵۰۰ درصد افزایش یافت. با این حال، در برخی تیمارها کاهش نسبی در تولید متان مشاهده شد که می‌تواند ناشی از حضور یا افزایش ترکیبات آنتی‌باکتریال نظیر فنول‌ها و تانن‌ها در محیط تخمیر پس از اعمال پیش‌تیمار فراصوت باشد. همچنین پاسخ بسترها به پیش‌تیمار فراصوت یکسان نبود و پوست موز بیشترین افزایش در تولید بیوهیدروژن را نشان داد، در حالی که تغییرات متان در همه بسترها مشابه نبود. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای افزایش کارایی تخمیر بی‌هوازی و بهبود تولید بیوهیدروژن از ضایعات کشاورزی موردتوجه

نتایج این پژوهش نشان داد که پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند نقش مؤثری در بهبود فرایند تخمیر بی‌هوازی زیست‌توده‌های کشاورزی و افزایش تولید بیوهیدروژن داشته باشد. اعمال پیش‌تیمار فراصوت به مدت ۵ دقیقه با توان ۳۰۰ وات موجب افزایش ۵۰/۸۷ درصدی تولید بیوهیدروژن در مقایسه با نمونه‌های بدون پیش‌تیمار شد که این امر احتمالاً به دلیل افزایش دسترسی‌پذیری ترکیبات آلی و تسهیل فعالیت میکروارگانیسم‌ها در محیط تخمیر است. بررسی روند تجمع گازهای تولیدی نشان داد که استفاده از این پیش‌تیمار علاوه بر افزایش تولید هیدروژن، موجب افزایش حدود ۲/۹ درصدی تولید متان نیز گردید که بیانگر بهبود تجزیه‌پذیری زیستی بسترهای مورد مطالعه است. در

محمود محمودی اشکفتکی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی،
روشناسی، مشاوره فنی
امین لطفعلیان دهکردی: پردازش داده‌ها، تحلیل آماری
حمید خفاجه: استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن
سیده حدیثه بهرام شاپهرامی: جمع‌آوری داده‌ها

قرار گیرد. با این حال، نتایج حاصل نشان‌دهنده یک پاسخ بستر-
وابسته است و تعمیم کلی آن به تمامی زیست‌توده‌ها با محدودیت
مواجه است.

مشارکت نویسندگان

References

1. Deshavath, N. N., Veeranki, V. D., & Goud, V. V. (2019). Lignocellulosic Feedstocks for the Production of Bioethanol: Availability, Structure, and Composition. Elsevier. pp. 1-19.
2. Kamali, S. M., Abdi, R., Rohani, A., Abdollahpour, S., & Ebrahimi, S. (2022). Optimization of Biogas Production Efficiency from Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste under Thermal Pretreatment at Different Concentrations. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(3), 409-421. <https://doi.org/10.22067/jam.2021.68771.1018>
3. Kim, D. (2018). Physico-chemical conversion of lignocellulose: Inhibitor effects and detoxification strategies: A mini review. *Molecules*, 23, 309. <https://doi.org/10.3390/molecules23020309>
4. Kumar, A. K., & Sharma, S., (2017). Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: A review. *Bioresources and Bioprocessing*, 4, 1-19.
5. Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Ghani, A. (2022). An efficient process for improvement of biohydrogen and biomethane production from tomato waste: Inhibitory effects of ultrasonic pretreatment. *Fuel*, 328, 125273.
6. Mahmoodi-Eshkaftaki, M., Ebrahimi, R., & Ghasemi-Pirbaloti, A. (2017). Qualitative and quantitative analysis of biogas generated from co-digestion of cow dung, municipal sewage and kitchen waste. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 192-203. <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.47760>
7. Mahmoodi-Eshkaftaki, M., Rafiee, M. R., & Mahmoudi, M. (2023). Efficiency of ultrasonic pretreatment on improving biodegradability of tomato wastes and increasing biohydrogen production. *BioEnergy Research*, 16(4), 2590-2603.
8. Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Rahmanian-Koushkaki, H. (2020). An optimum strategy for substrate mixture and pretreatment in biogas plants: Potential application for high-pH waste management. *Waste Management*, 113, 329341.
9. Mockaitis, G., Bruant, G., Guiot, S. R., Peixoto, G., Foresti, E., & Zaiat, M. (2020). Acidic and thermal pretreatments for anaerobic digestion inoculum to improve hydrogen and volatile fatty acid production using xylose as the substrate. *Renew Energy*, 145, 1388-1398. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.134>
10. Safari, M., & Abdi, R. (2016). Comparison of biogas production from rapeseed and wheat residues in compound with cattle manure. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(2), 476-487. <https://doi.org/10.22067/jam.v6i2.45667>
11. Sami, M., Akram, A., & Sharifi, M. (2021). Potential evaluation and modeling of biogas production from apple pomace. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 305-316. <https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.80322>
12. Taghinazhad, J., Abdi, R., & Adl, M. (2018). Modeling of biogas production process from cow manure with completely stirred tank reactor under semi continuously feeding. *Journal of Agricultural Machinery*, 8(1), 159-169. <https://doi.org/10.22067/jam.v8i1.57758>
13. Tajmiriahi, M., Momayez, F., & Karimi, K. (2020). The critical impact of rice straw extractives on biogas and bioethanol production. *Bioresource Technology*, 319, 124167. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124167>
14. Wang, X., Tsang, Y. F., Li, Y., Ma, X., Cui, S., Zhang, T. A., Hu, J. & Gao, M. T. (2017). Inhibitory effects of phenolic compounds of rice straw formed by saccharification during ethanol fermentation by *Pichia stipites*. *Bioresource Technology*, 244, 1059-1067. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.096>
15. Yalcinkaya, S., & Malina, J. F. (2015). Anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge and un-dewatered grease trap waste for assessing direct feed of grease trap waste in municipal digesters. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.08.007>
16. Yang, G., & Wang, J. L. (2019). Ultrasound combined with dilute acid pretreatment of grass for improvement of fermentative hydrogen production. *Bioresource Technology*, 275, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.013>