



Investigating the effect of black liquor on biogas production from biological waste

Alireza Tolouei^{1*}, Mohammad Ahmadi², Bita Moezzi³, Sina faizollahzadeh Ardabili⁴

1- Corresponding author, MSc Student, Department of Wood & Paper Technology, Faculty of Agriculture & Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, email: alirezatoloueiuma@gmail.com

2- Associated Professor, Department of Wood & Paper Technology, Faculty of Agriculture & Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Assistant Professor, Department of Wood & Paper Technology, Faculty of Agriculture & Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4- Assistant professor, Department of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

Received: May 2024

Accepted: August 2024

Abstract

Problem definition and objectives: The increasing global demand for sustainable energy solutions and the need for effective waste management have led to a growing interest in the use of renewable energies. Biomass energy occupies the first place among renewable energies in the world's energy supply; in such a way that in 2005, about 10% of the world's primary energy supply was provided from biomass sources. According to the findings, organic biomass can be considered as one of the potentials for biogas production. One of the organic sources that is known as a water-soluble waste material is black liquor. Black liquor usually contains a high concentration of organic compounds such as volatile fatty acids and other biodegradable substances. These organic compounds can act as a substrate and provide additional carbon and energy sources for anaerobic microorganisms responsible for biogas production. The presence of these available organic compounds in black liquor can potentially increase the overall efficiency of the anaerobic digestion process and lead to an increase in biogas yield compared to the use of biological waste alone. Related articles have been reviewed in the direction of biogas production by pyrolysis, but the study of the effect of black liquor on the biogas production process by anaerobic fermentation was seen as a gap. Accordingly, the aim of this study is to provide valuable insights into the optimization of biogas production processes by investigating the synergistic effects of combining black liquor with biological waste, which ultimately helps in the development of more efficient and sustainable renewable energy systems.

Methodology: In this study, wheat straw test samples were obtained from the educational and research farm of Mohaghegh Ardabili University. In order to conduct pre-extraction experiments and cooking operations of wheat straw, they were cut into sizes of one to three centimeters by a cutting machine and placed in a laboratory environment to reach equilibrium humidity. To build the reactor in this experiment, 9 glass bottles with a fixed volume of 1 liter and an effective working volume of 0.9 liters were used, and each digester was connected to two 1.5 liter bottles to

receive biogas and measure the production volume by the water displacement method. The prepared samples were entered into the reactor through the lid of these bottles, then the possibility of gas escaping around the lid was eliminated by sealing the lid, and the digesters (reactors) were placed inside a water bath. One of the important conditions for conducting the experiment is to keep the ambient temperature constant. For this purpose, a digital thermometer was used to measure the desired temperature with an accuracy of ± 0.1 and the reactors were placed in a hot water bath. This study included three treatments with three replications. The first treatment was the control treatment with a carbon to nitrogen ratio of 30 as the best carbon to nitrogen ratio for producing the highest volume of biogas. In the second and third treatments, black liquor was added to the samples at 5 and 10% by weight, respectively.

Results: The highest reduction was in the third treatment. According to the modeling obtained, the second treatment increased the biogas production potential by approximately 190%. However, the biogas production potential in the third treatment decreased by about 3% compared to the second treatment. Considering the 78% reduction in biogas production delay, the 3% reduction in biogas production potential can be ignored. Also, if a short period of time is considered for biogas production, the least delay in biogas production is required. Accordingly, with the conclusions obtained, it can be stated that the third treatment (presence of 10% water-soluble black liquor) can be considered as the best treatment with the highest biogas production efficiency.

Conclusion: The findings of this study demonstrate the potential of using black liquor as a feedstock in anaerobic digestion of biological wastes to enhance biogas production. It was observed that the addition of black liquor, rich in readily biodegradable organic compounds, provided a continuous supply of readily available carbon and energy sources for the anaerobic microorganisms responsible for biogas production. This continuous supply of readily available organic matter from black liquor helped maintain high activity levels of the digesting bacteria for a long time, leading to increased and more sustainable biogas yields.

Keywords: Biogas, sustainable production, black liquor, organic waste, renewable energies, biologic

بررسی تأثیر لیکور سیاه در تولید بیوگاز از پسماند زیستی

علیرضا طلوعی^{۱*}، محمد احمدی^۲، بیتا معزی پور^۳، سینا فیض اله زاده اردبیلی^۴

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، ایمیل: alirezatolouciuma@gmail.com

۲- دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- استادیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴- استادیار، گروه علوم مهندسی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: افزایش تقاضای جهانی برای راه حل‌های انرژی پایدار و نیاز به مدیریت مؤثر پسماند منجر به علاقه روزافزون به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. انرژی زیست‌توده در میان انرژی‌های تجدیدپذیر مقام نخست را در عرضه انرژی جهان دارا می‌باشد؛ به گونه‌ای که در سال ۲۰۰۵ حدود ۱۰ درصد عرضه انرژی اولیه جهان از منابع زیست‌توده تأمین گردیده است. مطابق با یافته‌ها، زیست‌توده‌های ارگانیک می‌تواند به عنوان یکی از پتانسیل‌های تولید بیوگاز مطرح باشد. یکی از منابع آلی که به عنوان یک ماده پسماند محلول در آب شناخته شده است، لیکور سیاه می‌باشد. لیکور سیاه معمولاً حاوی غلظت بالایی از ترکیبات آلی مانند اسیدهای چرب فرار و سایر مواد زیست‌تخریب‌پذیر است. این ترکیبات آلی می‌توانند به عنوان یک سوستر عمل کنند و منابع کربن و انرژی اضافی را برای میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی مسئول تولید بیوگاز فراهم کنند. وجود این ترکیبات آلی در دسترس در لیکور سیاه به طور بالقوه می‌تواند کارایی کلی فرآیند هضم بی‌هوازی را افزایش دهد و به‌تنهایی منجر به افزایش بازده بیوگاز در مقایسه با استفاده از مواد زائد بیولوژیکی شود. مقالات مرتبط، در راستای تولید بیوگاز به روش پیرولیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که بررسی تأثیر لیکور سیاه در فرآیند تولید بیوگاز به روش تخمیر بی‌هوازی به عنوان یک خلأ مشاهده گردید. بر این اساس هدف این مطالعه با بررسی اثرات هم‌افزایی ترکیب لیکور سیاه با پسماند بیولوژیکی، ارائه بینش‌های ارزشمندی در مورد بهینه‌سازی فرآیندهای تولید بیوگاز است که در نهایت به توسعه سیستم‌های انرژی تجدید پذیر کارآمدتر و پایدار کمک می‌کند.

مواد و روشها: در این مطالعه نمونه‌های مورد آزمایش کاه گندم از مزرعه آموزشی و پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی تهیه گردید. به منظور انجام آزمایش‌های پیش‌استخراج و عملیات پخت کاه گندم، توسط دستگاه برش به اندازه-هایی به طول یک تا سه سانتی‌متر برش داده شدند و جهت رسیدن به رطوبت تعادل در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند. برای ساخت راکتور در این آزمایش، از ۹ بطری شیشه‌ای با حجم ثابت ۱ لیتر و حجم کارکرد مؤثر ۰/۹ لیتر استفاده شد و هر هاضم به دو بطری ۱/۵ لیتری جهت دریافت بیوگاز و اندازه‌گیری حجم تولید به روش جابه‌جایی آب متصل شدند. نمونه‌های آماده شده از طریق درب این بطری‌ها وارد راکتور شدند سپس با مهر موم کردن درب آن‌ها امکان خروج گاز اطراف درب از بین برده شد و هاضم‌ها (راکتورها) در داخل یک حمام آبی قرار داده شدند. یکی از شرایط مهم انجام آزمایش، ثابت نگه‌داشتن دمای محیط می‌باشد. برای این منظور استفاده از یک دماسنج دیجیتالی دمای موردنظر را با دقت $\pm 0/1$ اندازه‌گیری کرده و راکتورها درون حمام آب گرم قرار داده شدند. این مطالعه شامل سه تیمار با سه تکرار بود. تیمار اول تیمار شاهد با نسبت کربن به نیتروژن ۳۰ به عنوان بهترین نسبت کربن به نیتروژن برای تولید بالاترین حجم بیوگاز بود. در تیمار دوم و سوم میزان لیکور سیاه به ترتیب با نسبت‌های ۵ و ۱۰ درصد وزنی به نمونه‌ها اضافه گردید.

نتایج: بالاترین میزان کاهش مربوط به تیمار سوم می‌باشد. مطابق با مدل‌سازی به دست آمده تیمار دوم پتانسیل تولید بیوگاز را به میزان تقریباً ۱۹۰ درصد افزایش داده است. این در حالی است که پتانسیل تولید بیوگاز در تیمار سوم نسبت به تیمار دوم حدود ۳ درصد کاهش داشته است. با توجه به کاهش ۷۸ درصدی تأخیر تولید بیوگاز، کاهش ۳ درصدی پتانسیل تولید بیوگاز می‌تواند قابل چشم پوشی باشد. همچنین در صورتی که بازه زمانی کوتاه‌مدتی برای تولید بیوگاز مدنظر باشد، نیاز به کمترین تأخیر تولید بیوگاز می‌باشد. بر این اساس با جمع‌بندی‌های به دست آمده، می‌توان عنوان کرد تیمار سوم (حضور ۱۰ درصد لیکور سیاه محلول در آب) می‌تواند به عنوان بهترین تیمار با بالاترین بازدهی تولید بیوگاز مطرح شود.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این مطالعه پتانسیل استفاده از لیکور سیاه را به عنوان ماده اولیه در هضم بی‌هوازی پسماندهای بیولوژیکی برای افزایش تولید بیوگاز نشان می‌دهد. مشاهده شد که افزودن لیکور سیاه، غنی از ترکیبات آلی به آسانی قابل تجزیه زیستی، عرضه مداوم کربن و منابع انرژی به راحتی قابل دسترسی برای میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی مسئول تولید بیوگاز را فراهم می‌کند. این عرضه مداوم مواد آلی به آسانی در دسترس از لیکور سیاه به حفظ سطح فعالیت بالای باکتری‌های هضم کننده برای مدت طولانی کمک کرد و منجر به افزایش و بازده بیوگاز پایدارتر شد.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، تولید پایدار، لیکور سیاه، پسماند آلی، انرژی‌های تجدید پذیر، پسماند زیستی.

مقدمه

در جهان امروزی مسائل زیست‌محیطی و تغییرات آب و هوایی به دلیل مصرف سوخت‌های فسیلی و تمرکز گازهای گلخانه‌ای از یک سو و گرانی و محدود بودن این سوخت‌ها از سوی دیگر زمینه‌های تحول در استفاده وسیع از انرژی‌های تجدید پذیر را فراهم کرده است [۱، ۲]. یکی از این انرژی‌های تجدید پذیر که به تازگی توجه زیادی به آن شده است، انرژی زیست‌توده است که در سطوح ملی، جهانی و منطقه‌ای، تغییر آب و هوا، امنیت انرژی و تولید مواد شیمیایی از منابع تجدید پذیر، محرک‌های اصلی برای استفاده از زیست‌توده در مکانی تحت عنوان پالایشگاه زیستی جهت تولید انرژی زیستی، زیست سوخت‌ها و مواد زیست‌شیمیایی از منابع تجدید پذیر هستند [۳-۵]. کارخانه‌های خمیر کاغذ سازی نمایانگر یک پالایشگاه برای استفاده مؤثرتر از یک زیست‌توده و به عبارت دیگر یک پالایشگاه زیستی هستند [۶-۸]. امروزه بحران انرژی در جهان، بیشتر کشورها و کارشناسان این بخش را به سوی استفاده از منابع انرژی زیستی سوق داده است [۹-۱۱]. در کشورهای صنعتی و توسعه یافته با اختصاص سرمایه‌های زیاد و به کارگیری امکانات وسیع، تحقیقات و مطالعات دامنه‌داری در این زمینه انجام شده است. از نتایج به دست آمده چنین به نظر می‌رسد که در طبیعت، انرژی‌های زیاد موجود است که با شناسایی و به کارگیری

فناوری و روش‌های مناسب، بازیافت دوباره آن‌ها امکان‌پذیر است [۱۲، ۱۳]. این گونه انرژی‌های تجدید شونده را به نام انرژی‌های نو می‌شناسند که مهم‌ترین آن‌ها انرژی باد، خورشید و بیوگاز است [۱۴]. انرژی زیست‌توده در میان انرژی‌های تجدید پذیر مقام نخست را در عرضه انرژی جهان دارا می‌باشد؛ به گونه‌ای که در سال ۲۰۰۵ حدود ۱۰ درصد عرضه انرژی اولیه جهان از منابع زیست‌توده تأمین گردیده است.

در حال حاضر سلولز با تبدیل به فرآورده‌های خمیر و کاغذ ارزش تجاری بیشتری دارد تا اینکه توسط هیدرولیز کردن آن به گلوکز، تبدیل به سوخت‌های مایع شود [۱۵-۱۷]. سوختن لیگنین که ارزش گرمایی بالایی (حدود ۲۵ mj/kg) دارد، قسمت عمده‌ای از انرژی تولید شده در کوره بازیابی را تأمین می‌کند [۱۸]. همی سلولزها ارزش گرمایی به طور قابل توجه پایین‌تری (حدود ۱۸,۶ mj/kg) دارند و لزوماً از حداکثر پتانسیل آن‌ها استفاده نمی‌شود. بسیاری از میکروارگانیسم‌ها با تخمیر قندهای همی سلولزی به فرآورده‌هایی مثل بیواتانول، بوتانول یا اسیدلاکتیک می‌توانند درآمدهای اقتصادی بالاتری نسبت به فرآیند سوختن کنونی به دست بیاورند [۱۹].

به دنبال کاهش تدریجی قیمت خمیر کاغذ شیمیایی در جهان، صنایع تولید کننده‌ی خمیر کاغذ به دنبال روش‌های جدیدی برای ایجاد ارزش افزوده‌ی بیشتر از

در محدوده ۵۱۶-۱۴۳ mL/gVS و ۴۲۹-۲۵ mL/gVS نشان دادند. این تغییرات در بازده متان در درجه اول به ترکیب تغذیه‌ای زیر لایه‌های مختلف نسبت داده می‌شود [۲۳]. مطابق با یافته‌ها، زیست‌توده‌های ارگانیکی می‌تواند به عنوان یکی از پتانسیل‌های تولید بیوگاز مطرح باشد. یکی از منابع آلی که به عنوان یک ماده پسماند محلول در آب شناخته شده است، لیکور سیاه می‌باشد. لیکور سیاه معمولاً حاوی غلظت بالایی از ترکیبات آلی مانند اسیدهای چرب فرار و سایر مواد زیست‌تخریب‌پذیر است. این ترکیبات آلی می‌توانند به عنوان یک سوستر عمل کنند و منابع کربن و انرژی اضافی را برای میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی مسئول تولید بیوگاز فراهم کنند. وجود این ترکیبات آلی در دسترس در لیکور سیاه به طور بالقوه می‌تواند کارایی کلی فرآیند هضم بی‌هوازی را افزایش دهد و به تنهایی منجر به افزایش بازده بیوگاز در مقایسه با استفاده از مواد زائد بیولوژیکی شود.

علاوه بر این، افزودن لیکور سیاه ممکن است به متعادل کردن نسبت کربن به نیتروژن (C/N) مواد اولیه هضم کمک کند که یک پارامتر مهم برای بهینه‌سازی تولید بیوگاز است. مواد زائد بیولوژیکی، مانند ضایعات مواد غذایی یا بقایای کشاورزی، ممکن است نسبت C/N نامتعادل داشته باشند که می‌تواند عملکرد فرآیند هضم بی‌هوازی را محدود کند. ترکیبات آلی موجود در لیکور سیاه می‌تواند به تنظیم نسبت C/N کمک کند و به طور بالقوه تعادل کلی مواد مغذی را بهبود بخشد و رشد و فعالیت جامعه میکروبی بی‌هوازی را تحریک کند. مطالعات محدودی در مورد نقش لیکور سیاه در تولید بیوگاز به کار گرفته شده‌اند. در مطالعه ارائه شده توسط Hübner و همکاران، سه مایع تجزیه در اثر حرارت تولید شده در ۳۳۰، ۴۳۰ و ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد در چهار غلظت مبتنی بر COD از ۳، ۶، ۱۲ و ۳۰ g/L-1 مورد بررسی قرار گرفت. سه غلظت پایین تر تولید بیوگاز قابل توجهی را نشان دادند در حالی که دوز ۳۰ گرم g/L-1 باعث مهار فرآیند شد. بالاترین بازده متان 1199 ± 18 mLg COD-1 برای مایع تجزیه در اثر حرارت ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد و به دنبال آن نمونه ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد با مقادیر کمی کمتر مشاهده شد. نمونه ۵۳۰ درجه

مواد لیگنوسلولزی و افزایش سود خود هستند. در این راستا و با توجه به اهمیت تولید هم‌زمان فرآورده‌های با ارزش افزوده بیشتر از همی سلولزها و خمیرکاغذ شیمیایی، صنایع تولید کننده خمیرکاغذ شیمیایی در حال تبدیل به مجتمع‌های عظیم صنعتی به نام پالایشگاه زیستی جامع فرآورده‌های جنگلی هستند که در آن ابتدا مواد تشکیل دهنده چوب از یکدیگر جدا شده و هر یک مسیر جداگانه‌ای را تا تولید محصولات با ارزش افزوده زیاد طی می‌کنند [۲۰]. با توجه به محدود بودن ذخایر سوخت‌های فسیلی و تاثیرگذاری آن‌ها بر محیط‌زیست [۲۱] پژوهشگران در پی یافتن جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی هستند. در صنعت خودروسازی در دنیا به دنبال امکان جایگزینی سوخت و فناوری پیش‌ران (زیست سوخت‌ها، هیدروژن، خودروهای برقی، پیل سوختی، خودروهای هیبریدی و فناوری خورشیدی) می‌باشند. به عنوان جایگزین مناسب در کوتاه‌مدت گاز طبیعی در جایگاه والتری قرار می‌گیرد. گاز طبیعی به عنوان سوخت به طور مستقیم و یا به صورت فشرده و یا مایع کاربرد دارد. همچنین از گاز طبیعی می‌توان برای سنتز سوخت مایع مانند مخلوط هیدروکربن‌ها (بنزین سنتزی) و یا تهیه متانول استفاده کرد. از جمله جایگزین‌های سوخت‌های فسیلی می‌توان از سوخت‌های زیست نام برد. سوخت‌های زیستی از مواد اولیه تجدید پذیر یعنی زیست‌توده تهیه می‌شوند [۲۲]. در سال‌های اخیر منابع آلی بسیاری به عنوان مکمل تهیه سوستر^۱ برای تولید بیوگاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نووکولو و همکاران به ارائه تجزیه و تحلیل دقیق از انواع مختلف پسماندهای آلی پرداختند که به عنوان بستری برای تولید پایدار بیوگاز استفاده شده‌اند. تشکیل بیوگاز از بسترهای مختلف گزارش شده در ادبیات مورد بررسی قرار گرفت، تجزیه و تحلیل و خصوصیات این بسترها مزایا و معایب مرتبط با هر بستر را ارائه کرد. یافته‌های به دست آمده نشان داد که بازده متان برای تمام کود حیوانی از ۱۵۷ تا ۵۰۰ mL/g با کود بز و خوک جایگزین کود حیوانی دیگر می‌شود، در حالی که زیست‌توده لیگنوسلولزی از ۱۶۰ تا ۲۱۲ mL/g متغیر است. علاوه بر این، پسماندهای جامد شهری آلی و پسماندهای صنعتی بازده متان را به ترتیب

² Chemical Oxygen Demand¹ Substrate

تعادل در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند. نمونه‌ها بعد از رسیدن به رطوبت تعادل به دلیل جلوگیری از تبادل رطوبتی و تغییر میزان رطوبت، در کیسه‌های پلی‌اتیلن بسته‌بندی شدند. سپس میزان رطوبت نمونه‌های تمامی کیسه‌ها اندازه‌گیری شد و در طول آزمایش‌ها، بعد از هر بار برداشت نمونه به منظور ثابت ماندن شرایط رطوبتی، درب کیسه بسته می‌شد. همچنین لیکور سیاه حاصل از پخت کاه گندم در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به راکتور اضافه شد و داخل بن ماری قرار گرفت.

برای امر تسریع در هضم بی‌هوازی و شروع فعالیت میکروارگانیسم‌ها نیاز به استارتر است که برای این کار مقدار یک کیلوگرم محتویات شکمبه گاوی تازه ذبح شده از کشتارگاه دامی شهرستان اردبیل تهیه گردید و با اضافه کردن یک لیتر آب به آن، سریعاً در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد در درون آون به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شد و موقع بارگذاری راکتورها به هر بطری مقدار ۵۰ گرم از این محلول غنی‌شده اضافه گردید. جدول ۱ مشخصات کاه گندم و استارتر هضم بی‌هوازی را ارائه می‌دهد.

راکتور تولید بیوگاز

راکتور یا تانک تخمیر، بخش اصلی دستگاه بیوگاز است که مواد زائد آلی پس از ورود به هاضم به مدت یک تا دو ماه در آن نگهداری می‌شوند در طول این مدت، مواد زائد آلی در شرایط بی‌هوازی بر اثر فعالیت باکتری‌ها، تثبیت حرارت، رطوبت و عدم نفوذ آب و هوا تجزیه شده و نتیجه این تجزیه، تولید بیوگاز است. برای ساخت راکتور در این آزمایش، از ۹ بطری شیشه‌ای با حجم ثابت ۱ لیتر و حجم کارکرد مؤثر ۰/۹ لیتر استفاده شد و هر هاضم به دو بطری ۱/۵ لیتری جهت دریافت بیوگاز و اندازه‌گیری حجم تولید به روش جابه‌جایی آب متصل شدند. نمونه‌های آماده شده از طریق درب این بطری‌ها وارد راکتور شدند سپس با مهر موم کردن درب آن‌ها امکان خروج گاز اطراف درب از بین برده شد و هاضم‌ها (راکتورها) در داخل یک حمام آبی قرار داده شدند.

سانتی‌گراد به بازده 129 ± 19 mLg COD-1 کاهش یافت. اکثر ترکیبات آلی^۳ موجود در مایع پیرولیز (به عنوان مثال فورفورال، فنل، کاتکول، گاپاکول و لووگلوکوزان) به زیر حد تشخیص (کرزول ۱۰-۶۰٪) کاهش یافتند. در نتیجه، تجزیه در اثر حرارت و هضم بی‌هوازی یکپارچه علاوه بر تبدیل حرارتی مواد هضم، نوید تبدیل زیستی مایعات پیرولیز را نیز می‌دهد [۲۴]. بر اساس بررسی‌های انجام شده مطالعات دیگری که بتواند در راستای بررسی تأثیر لیکور سیاه محلول در آب در فرایند تولید بیوگاز مشارکت داشته باشد یافت نشد. مقالات مرتبط، در راستای تولید بیوگاز به روش پیرولیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که بررسی تأثیر لیکور سیاه در فرایند تولید بیوگاز به روش تخمیر بی‌هوازی به عنوان یک خلأ مشاهده گردید. بر این اساس هدف این مطالعه با بررسی اثرات هم‌افزایی ترکیب لیکور سیاه با پسماند بیولوژیکی، ارائه بینش‌های ارزشمندی در مورد بهینه‌سازی فرآیندهای تولید بیوگاز است که در نهایت به توسعه سیستم‌های انرژی تجدید پذیر کارآمدتر و پایدار کمک می‌کند. این یافته‌ها ممکن است پیامدهایی برای مدیریت پسماند، تولید انرژی زیستی و اقتصاد دایره‌ای با شناسایی استراتژی‌هایی برای افزایش استفاده از جریان‌های پسماند داشته باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از ترکیب استارتر شکمبه گاوی و کاه گندم به عنوان پسماند بیولوژیک پایه و همچنین از لیکور سیاه محلول در آب به عنوان افزودنی سوبسترا استفاده شد.

تهیه و آماده‌سازی مواد اولیه

نمونه‌های مورد آزمایش کاه گندم از مزرعه آموزشی و پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی تهیه گردید به منظور انجام آزمایش‌های پیش‌استخراج و عملیات پخت کاه گندم، توسط دستگاه برش به اندازه‌هایی به طول یک تا سه سانتی‌متر برش داده شدند و جهت رسیدن به رطوبت

³ VOC (volatile organic compound)

جدول ۱. مشخصات بیولوژیکی مواد تشکیل دهنده سوبسترا

پارامترها	استارتر	کاه گندم
OC	۳۵/۴۶	۴۱/۳۴
KJN	۱/۳۳	۰/۴۲
C/N ratio	۲۶/۶۶	۹۸/۴۳
TS	۴۵/۱۲	۲/۲۷
VS/TS	۷۴	۷۸/۵
Moisture (%)	۸۱	۸

نجفی و همکاران به عنوان نسبت بهینه انتخاب گردید [۲۵]. در تیمار دوم و سوم میزان لیکور سیاه به ترتیب با نسبت‌های ۵ و ۱۰ درصد وزنی به نمونه‌ها اضافه گردید. در ادامه دمای تولید بیوگاز در داخل راکتورها در شرایط مزوفلیک (حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد) تنظیم شد.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی و شیمیایی

مواد اولیه (لیکور سیاه) و کاه گندم برای تعیین برخی خواص فیزیکی و شیمیایی از جمله کربن و نیتروژن، میزان رطوبت، میزان ماده خشک (TS) و مواد آلی فرار به آزمایشگاه مهندسی خاک دانشگاه محقق اردبیلی منتقل گردیدند.

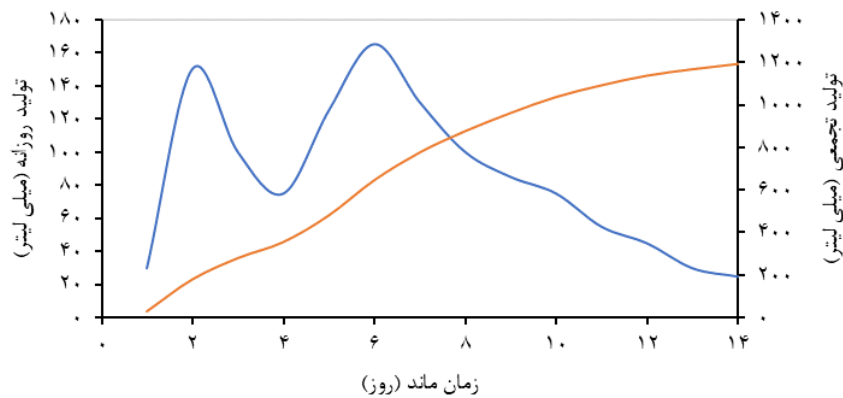
مدل‌سازی

در مطالعه حاضر حجم بیوگاز تولیدی بر اساس رشد جمعیت باکتری‌ها از طریق هضم بی‌هوازی مدل سازی شد. برای این منظور از مدل لجستیک اصلاح شده برای تخمین تولید متان به عنوان تابعی از زمان تولید استفاده شد (رابطه ۱).

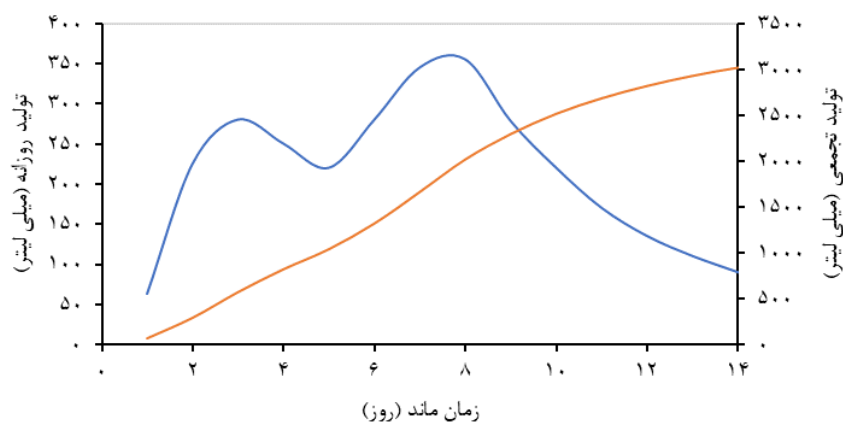
$$Y = \frac{A}{\left\{ 1 + \exp \left[\frac{4\mu}{A} (\lambda - t) + 2 \right] \right\}} \quad (1)$$

یکی از شرایط مهم انجام آزمایش، ثابت نگه‌داشتن دمای محیط می‌باشد. برای این منظور استفاده از یک دماسنج دیجیتال دمای موردنظر را با دقت ± 0.1 اندازه‌گیری کرده و راکتورها درون حمام آب گرم قرار داده شدند. حجم مخزن نگه‌دارنده گاز به مقدار گاز تولیدشده و حجم گاز خارج شده از مخزن بستگی دارد. تولید گاز به نوع و میزان مواد تخمیری، دمای هاضم و زمان ماند مواد وابسته می‌باشد. تولید گاز در دمای بالا و ثابت با زمان ماند طولانی همراه با به هم زدن لجن افزایش می‌یابد. دمای متغیر و پایین (۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد) و زمان اقامت کوتاه توأم با به هم زدن آرام اثر سویی بر تولید گاز دارد. در این آزمایش از بطری‌های پلاستیکی ۱/۵ لیتری به عنوان محفظه بیوگاز تولیدی استفاده شده و به منظور اندازه‌گیری حجم بیوگاز تولیدی با ایجاد سوراخ روی درب راکتورها و قرار دادن شیلنگ‌های شفاف، گاز خروجی را به بطری‌های محفظه گاز هدایت نموده و برای کنترل بیوگاز تولیدی و ممانعت از نشت گاز، هنگام اندازه‌گیری بیوگاز، یک شیر در بالای هر راکتور و در ابتدای شیلنگ‌ها قرار داده شد.

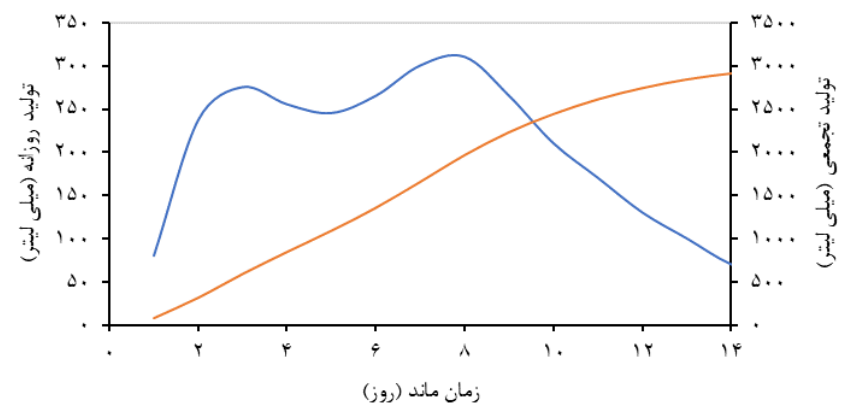
این مطالعه شامل سه تیمار با سه تکرار بود. تیمار اول تیمار شاهد با نسبت کربن به نیتروژن ۳۰ به عنوان بهترین نسبت کربن به نیتروژن برای تولید بالاترین حجم بیوگاز بود. این نسبت مطابق با مطالعه انجام شده توسط



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱. نتایج تولید روزانه و تجمعی بیوگاز تحت تیمارهای ۱ (الف)، ۲ (ب) و ۳ (ج)

نتایج مدل سازی

مدل سازی با استفاده از مدل های رشد میکروبی یکی از مراحل مهم در تولید بیوگاز مطرح می باشد. مدل سازی

از چند منظر می تواند مورد توجه قرار گیرد. یکی از مهم ترین آن ها ایجاد یک نقشه مسیر برای دستیابی به پتانسیل نهایی تولید و تأخیر در تولید می باشد. به این

تیمار دوم حدود ۳ درصد کاهش داشته است. با توجه به کاهش ۷۸ درصدی تأخیر تولید بیوگاز، کاهش ۳ درصدی پتانسیل تولید بیوگاز می‌تواند قابل چشم پوشی باشد. همچنین در صورتی که بازه زمانی کوتاه مدتی برای تولید بیوگاز مدنظر باشد، نیاز به کمترین تأخیر تولید بیوگاز می‌باشد. بر این اساس با جمع‌بندی‌های به دست آمده، می‌توان عنوان کرد تیمار سوم (حضور ۱۰ درصد لیکور سیاه محلول در آب) می‌تواند به عنوان بهترین تیمار با بالاترین بازدهی تولید بیوگاز مطرح شود.

ترتیب که از یافته‌های مدل‌سازی نیز می‌توان در مورد انتخاب بهترین تیمار تولید تصمیم‌گیری کرد. جدول ۲ نتایج به دست آمده از مرحله مدل‌سازی لجستیک را ارائه می‌دهد. مطابق با جدول ۲ می‌توان عنوان کرد با افزودن لیکور سیاه میزان تأخیر روزانه تولید (λ) به ترتیب به میزان ۳ و ۷۸ درصد کاهش یافته است. بالاترین میزان کاهش مربوط به تیمار سوم می‌باشد. مطابق با مدل‌سازی به دست آمده تیمار دوم پتانسیل تولید بیوگاز (Y) را به میزان تقریباً ۱۹۰ درصد افزایش داده است. این در حالی است که پتانسیل تولید بیوگاز در تیمار سوم نسبت به

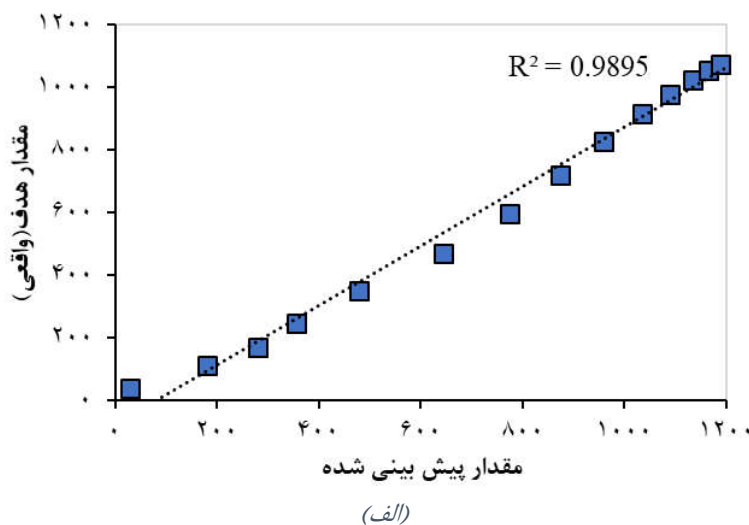
جدول ۲. نتایج به دست آمده از مرحله مدل‌سازی

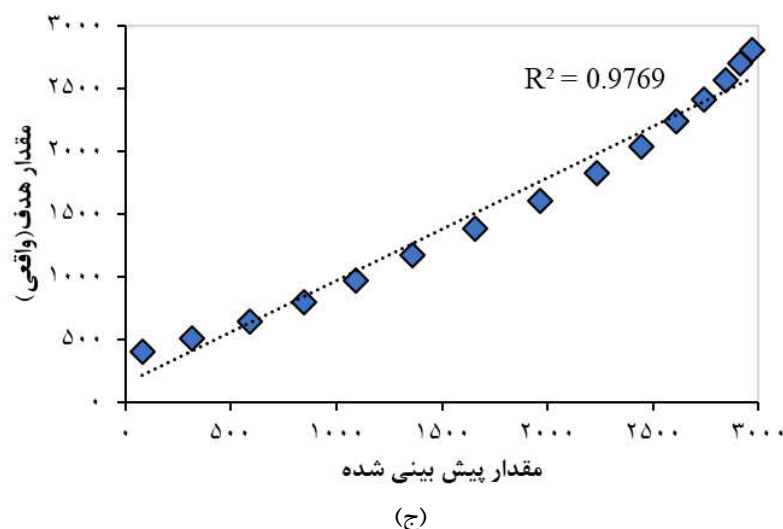
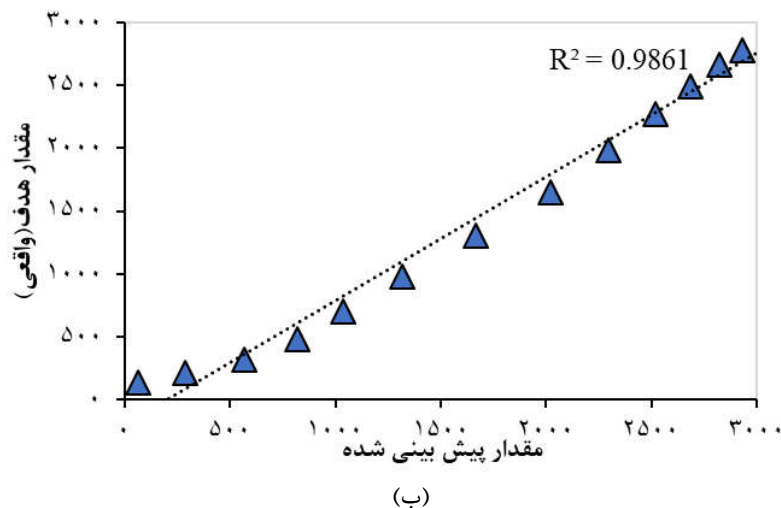
	Y	A	μ_m	λ	R^2	RMSE	MAPE
	mL/gr.VS	mL/gr.VS	mL/gr.VS	day			
بدون لیکور سیاه (تیمار ۱)	۱۰۸۷/۶۰	۱۱۱۰/۶۵	۱۴۸/۶۸	۳/۳۶	۰/۹۸	۳/۵۱	۹/۲۱
لیکور سیاه ۵ (تیمار ۲)	۲۹۱۶/۶۶	۳۰۱۰/۶۵	۳۴۸/۶۸	۳/۲۶	۰/۹۸	۶/۰۱	۱۳/۴۱
لیکور سیاه ۱۰ (تیمار ۳)	۲۸۰۷/۳۱	۳۲۱۰/۶۵	۲۲۲/۲۲	۰/۷۶	۰/۹۷	۷/۹۷	۱۴/۲۲

تولید تجمعی بیوگاز است Y

درصد) توانسته‌اند مقادیر بیوگاز تولید شده را پیش‌بینی کنند. بر این اساس می‌توان عنوان کرد نتایج مدل‌سازی می‌تواند قابل اطمینان باشد.

شکل ۲ مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی تولید بیوگاز در تیمارهای آزمایش را از نقطه نظر ضریب تبیین مورد مقایسه قرار می‌دهد. مطابق با نتایج به دست آمده می‌توان عنوان کرد هر سه مدل‌سازی با دقت بالایی (بالای ۹۷





شکل ۲. نتایج مقادیر مدل سازی برای پیش بینی مقدار تولید بیوگاز تحت تیمارهای ۱ (الف)، ۲ (ب) و ۳ (ج)

افزایش مقیاس فرآیند به یک عملیات تجاری در مقیاس بزرگتر ممکن است چالش‌های اضافی مرتبط با طراحی راکتور، راندمان اختلاط و کنترل فرآیند ایجاد کند. چالش‌های تحقیق نیز یکی از موارد مهم در بخش نتایج می‌باشد که می‌تواند مسیری برای مطالعات آینده مطرح باشد. از جمله چالش‌های مهم تحقیقاتی در این مطالعه، بهینه‌سازی نسبت هضم مشترک بین لیکور سیاه و مواد اولیه پسماند بیولوژیکی برای به حداکثر رساندن تولید بیوگاز است. تعیین نسبت بهینه ممکن است به آزمایش‌های و مطالعات بهینه‌سازی گسترده نیاز داشته باشد. علاوه بر این، مشخص کردن تغییرات در ساختار و پویایی جامعه میکروبی بی‌هوازی در طول فرآیند هضم مشترک می‌تواند بینش‌های ارزشمندی را در مورد

محدودیت‌ها و چالش‌های تحقیق

یکی از محدودیت‌های کلیدی این مطالعه، تنوع مواد اولیه پسماند بیولوژیکی است. پسماندهای بیولوژیکی بسته به منبع، مکان و زمان جمع‌آوری می‌توانند از نظر ترکیب بسیار متغیر باشند. این تنوع در خواص شیمیایی و فیزیکی مواد اولیه می‌تواند عدم قطعیت‌ها را ایجاد کند و دستیابی به نتایج ثابت را چالش برانگیز کند. علاوه بر این، ترکیب لیکور سیاه مورد استفاده نیز بسته به منبع و فرآیند تولید می‌تواند متفاوت باشد که ممکن است بر نتایج تولید بیوگاز متفاوت تأثیر بگذارد. محدودیت دیگر، چالش‌های بالقوه افزایش مقیاس است، زیرا مطالعه ممکن است در مقیاس آزمایشگاهی یا آزمایشی انجام شود و

زیست‌محیطی، برای اجرای موفقیت‌آمیز و پذیرش گسترده این رویکرد هضم هم‌زمان در زمینه تبدیل پسماند به انرژی بسیار مهم خواهد بود.

منابع

- [1] Mortaza, M., Najafi, B. (2022). 'Application of artificial neural network and response surface method in predicting and optimizing performance parameters and pollution of a dual-fuel diesel engine in the presence of water additive', *Journal of Environmental Science Studies*, 7(2), pp. 4937-4948. doi: 10.22034/jess.2022.334830.1751
- [2] Amid, S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Hajiahmad, A., Najafi, B., Ghaziaskar, H.S., Rastegari, H., Hosseinzadeh-Bandbafha, H. and Mohammadi, P., 2020. Effects of waste-derived ethylene glycol diacetate as a novel oxygenated additive on performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel/biodiesel blends. *Energy conversion and management*, 203, p.112245.
- [3] Varling, A.S., Christensen, T.H. and Bisinella, V., 2023. Life cycle assessment of alternative biogas utilisations, including carbon capture and storage or utilisation. *Waste Management*, 157, pp.168-179.
- [4] Sheng, Q., Lu, Y., Yuan, S., Li, X., Dai, X., Guo, Y. and Dong, B., 2023. Effect of nitrite on hydrolysis-acidification, biogas production and microbial community in semi-continuous two-phase anaerobic digestion of sewage sludge. *Journal of Environmental Sciences*, 126, pp.434-444.
- [5] Santoso, A., Lukito, D.C., Sanjaya, E.H., Sumari, S., Wijaya, A.R., Putri, D.E. and Asrori, M.R., 2023, January. The effect of starter on biogas production of anaerobic digestion of cow manure using active zeolite. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2569, No. 1). AIP Publishing.
- [6] Carvalheiro, F., Duarte, L.C. and Girio, F., 2008. Hemicellulose biorefineries: a review on biomass pretreatments. *Journal of scientific & industrial research*, pp.849-864.
- [7] Sonsale, A.N., Purohit, J.K. and Pohekar, S.D., 2021. Renewable & alternative energy sources for strategic energy management in recycled paper & pulp industry. *Bioresource Technology Reports*, 16, p.100857.
- [8] Zainab, A.K., Pradhan, R., Thevathasan, N., Arku, P., Gordon, A. and Dutta, A., 2018. Beneficiation of renewable industrial wastes from paper and pulp processing. *Aims Energy*, 6(5), pp.880-907.
- [9] Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Nazemi, F., Khounani, Z., Ghanavati, H., Shafiei, M., Karimi, K., Lam, S.S., Aghbashlo, M. and Tabatabaei, M., 2022. Safflower-based biorefinery producing a broad spectrum of

مکانیسم‌های زیربنایی ارائه دهد، اما ممکن است نیاز به استفاده از تکنیک‌های مولکولی پیشرفته، مانند متانژنومیکس یا پروفایل جامعه داشته باشد. علاوه بر این، ارزیابی اثرات هم‌افزایی بالقوه بین لیکور سیاه و مواد اولیه ضایعات بیولوژیکی بر تولید بیوگاز می‌تواند یک چالش تحقیقاتی پیچیده باشد، زیرا ممکن است نیاز به نظارت و تجزیه‌وتحلیل فرآیند دقیق برای تعیین مکانیسم‌ها و فعل و انفعالات خاصی داشته باشد که منجر به افزایش بازده بیوگاز می‌شود.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه پتانسیل استفاده از لیکور سیاه را به عنوان ماده اولیه در هضم بی‌هوازی پسماندهای بیولوژیکی برای افزایش تولید بیوگاز نشان می‌دهد. مشاهده شد که افزودن لیکور سیاه، غنی از ترکیبات آلی به آسانی قابل تجزیه زیستی، عرضه مداوم کربن و منابع انرژی به راحتی قابل دسترسی برای میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی مسئول تولید بیوگاز را فراهم می‌کند. این عرضه مداوم مواد آلی به آسانی در دسترس از لیکور سیاه به حفظ سطح فعالیت بالای باکتری‌های هضم کننده برای مدت طولانی کمک کرد و منجر به افزایش و بازده بیوگاز پایدارتر شد. علاوه بر این، این مطالعه نشان داد که بهینه‌سازی تعادل مواد مغذی، به‌ویژه نسبت کربن به نیتروژن، از طریق هضم هم‌زمان لیکور سیاه و ضایعات بیولوژیکی، محیط مطلوب‌تری برای رشد و فعالیت پایدار ایجاد می‌کند. جمعیت متنوع میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی درگیر در فرآیند تولید بیوگاز، این بهینه‌سازی اکولوژی میکروبی در نهایت به تولید بیوگاز افزایش یافته و طولانی مدت از سیستم هضم بی‌هوازی کمک کرد. در حالی که این مطالعه مزایای ترکیب لیکور سیاه در تولید بیوگاز از پسماندهای بیولوژیکی را برجسته کرده است، همچنین چندین محدودیت و چالش تحقیقاتی را شناسایی کرده است که تحقیقات بیشتر را ایجاب می‌کند. این‌ها شامل پرداختن به تنوع مواد اولیه، تفاوت‌های ترکیب لیکور سیاه، ملاحظات افزایش مقیاس و اثرات بازدارندگی بالقوه است. ادامه تحقیقات در این زمینه‌ها، همراه با ارزیابی‌های امکان‌سنجی فنی-اقتصادی و

2017. Cellulosic biofuel contributions to a sustainable energy future: Choices and outcomes. *Science*, 356(6345), p.eaal2324.
- [17] Pflieger, M. and Kroflič, A., 2017. Acute toxicity of emerging atmospheric pollutants from wood lignin due to biomass burning. *Journal of hazardous materials*, 338, pp.132-139.
- [18] Walton, S.L., Hutto, D., Genco, J.M., Walsum, G.P.V. and Heiningen, A.R.V., 2010. Pre-extraction of hemicelluloses from hardwood chips using an alkaline wood pulping solution followed by kraft pulping of the extracted wood chips. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(24), pp.12638-12645.
- [19] Perlack, R.D., 2005. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply. Oak Ridge National Laboratory.
- [20] Nwokolo, N., Mukumba, P., Obileke, K. and Enebe, M., 2020. Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production. *Processes*, 8(10), p.1224.
- [21] Hübner, T. and Mumme, J., 2015. Integration of pyrolysis and anaerobic digestion—use of aqueous liquor from digestate pyrolysis for biogas production. *Bioresource technology*, 183, pp.86-92.
- [22] Najafi, B. and Ardabili, S.F., 2018. Application of ANFIS, ANN, and logistic methods in estimating biogas production from spent mushroom compost (SMC). *Resources, Conservation and Recycling*, 133, pp.169-178.
- biofuels and biochemicals: A life cycle assessment perspective. *Science of The Total Environment*, 802, p.149842.
- [10] Kumar, A., 2021. Current and future perspective of microalgae for simultaneous wastewater treatment and feedstock for biofuels production. *Chemistry Africa*, 4, pp.249-275.
- [11] Karpagam, R., Jawaharraj, K. and Gnanam, R., 2021. Review on integrated biofuel production from microalgal biomass through the outset of transesterification route: a cascade approach for sustainable bioenergy. *Science of The Total Environment*, 766, p.144236.
- [12] Jeswani, H.K., Chilvers, A. and Azapagic, A., 2020. Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A*, 476(2243), p.20200351] W. Wu, Y.-C. Lei, and J.-S. J. B. t. Chang, "Life cycle assessment of upgraded microalgae-to-biofuel chains," vol. 288, p. 121492, 2019
- [13] Ziaei, M. and Hajizadeh, F., 2010. Biomass Energy and Environment, First Iranian Bioenergy Conference, Eslamshahr, <https://civilica.com/doc/92436>
- [14] Brown, T.R. and Brown, R.C., 2013. A review of cellulosic biofuel commercial-scale projects in the United States. *Biofuels, bioproducts and biorefining*, 7(3), pp.235-245.
- [15] Robertson, M., 2021. Sustainability principles and practice.
- [16] Robertson, G.P., Hamilton, S.K., Barham, B.L., Dale, B.E., Izaurralde, R.C., Jackson, R.D., Landis, D.A., Swinton, S.M., Thelen, K.D. and Tiedje, J.M.,