



مقایسه‌ی بررسی تأثیر پیش تیمارهای پلاسما‌ی سرد و اولتراسونیک بر عملکرد هضم بی‌هوازی پسماند کاه کلزا در راکتور ناپیوسته

زهرا مال میر^۱، حسین حاجی آقا علیزاده^{*۱}، مجید رسولی^۱

^۱ گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران (zahra.malimir@yahoo.com)

چکیده

در این پژوهش تأثیر پیش تیمار غیر حرارتی و غیر شیمیایی بر عملکرد هضم بی‌هوازی پسماند کاه کلزا که یک ماده‌ی لیگنوسلولزی است، بررسی شد. برای انجام آزمایش‌ها از تست پتانسیل متان بیوشیمیایی استفاده شد. تحلیل داده‌ها در قالب طرح فاکتوریل کامل و با استفاده از نرم افزار Design Expert 13 انجام شد. نتایج نشان داد، پیش تیمار آلتراسونیک تولید کل بیوگاز را از طریق تغییر محیط اولیه هضم بی‌هوازی و تغییر در ساختار سلولز بهبود بخشید. عوامل اصلی موثر بر تولید بیوگاز در نمونه‌های مختلف پیش تیمار شده متفاوت بودند و تغییرات همبستگی فعالیت سلولزی، کاهش محتوای قند، pH و محتوای اسیدهای چرب در طول فرآیند هضم بی‌هوازی، محیط را برای هضم بی‌هوازی مناسب تر کرد. همچنین در آزمایش پیش تیمار پلاسما، افزایش درصد TS با تولید بیوگاز رابطه‌ی مستقیم داشت و $TS=10\%$ بیشترین میزان تولید بیوگاز را دارا بود اما در کل می‌توان گفت تأثیر پیش تیمار پلاسما در افزایش تولید بیوگاز از نظر آماری معنی دار نبود.

کلمات کلیدی: هضم بی‌هوازی، پسماند لیگنوسلولزی، انرژی‌های تجدید پذیر، مدیریت پسماند.

*نویسنده مسئول: حسین حاجی آقا علیزاده (h-alizade@basu.ac.ir)

مقدمه

در سال‌های اخیر کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف این سوخت‌ها منجر به تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تولید سوخت از منابع تجدید پذیر گردیده است. سالانه صدها میلیون تن از ضایعات محصولات کشاورزی بر جای می‌ماند که به آسانی و باقیمت ارزان در دسترس می‌باشد. تولید سوخت‌های زیستی از مواد لیگنوسلولزی بر جای مانده از ضایعات کشاورزی به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی مطرح شده است. بر اساس شاخص برداشت، میزان پسماند گیاه کلزا حدود ۶-۴ تن در هکتار می‌باشد. طبق نظر کارشناسان کشاورزی این پسماند به دلیل پایین بودن ارزش غذایی برای تغذیه دام مناسب نمی‌باشد و حجم قابل توجهی از ساقه‌ی کلزا سالیانه بدون کاربرد خاصی از بین می‌رود [۱]. باز یافت انرژی از پسماندها، روش مناسبی برای مدیریت پسماندها و تولید انرژی از پسماندهای مواد غذایی است. تولید انرژی به روش سوزاندن پسماندها، گازهای آلاینده قابل توجهی تولید می‌کند که تهدیدی برای محیط‌زیست می‌باشد [۲]. هضم بی‌هوازی یکی از مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها برای تیمار باقی مانده‌های غذایی و بازیابی انرژی زیستی است [۶]. یکی از عمده معضلات تولید بیوگاز از بقایای محصولات مدت‌زمان طولانی مرحله هیدرولیز مواد پیچیده می‌باشد که منجر به کاهش راندمان تولید بیوگاز خواهد شد. لذا پیش تیمار پسماند حاوی مواد لیگنوسلولزی امری ضروری برای حصول نتیجه بهتر در فرآیند هضم بی‌هوازی می‌باشد. کاه کلزا پس از خرمن کوبی و جدا شدن دانه رسیده از گیاه به دست می‌آید و شامل برگ، ساقه، پوشینه‌ی دانه‌ها و ضمائم آن‌هاست. این کاه شامل مقادیر قابل ملاحظه‌ای سلولز و همی سلولز می‌باشد [۱۱].

مقادیر زیادی (۳ تن در هکتار) کاه کلزا به‌طور معمول پس از برداشت به‌عنوان زباله و کاه باقی مانده و می‌سوزد و یا در زمین شخم می‌خورد؛ بنابراین، این باقی مانده‌های کشاورزی ارزش تبدیل به مواد با عملکرد بالا را دارند. متوسط طول و قطر الیاف کاه کلزا به ترتیب ۱۲۱۵ و ۲۸ میلی‌متر است که در یک رنج با الیاف چوب سخت قرار دارد [۱۷]. اجزای اصلی کاه کلزا شامل ۴۳ درصد سلولز، ۱۷ درصد لیگنین، ۱۲ درصد مواد قابل استخراج و ۶ درصد خاکستر ساخته شده است [۳].

هدف از فناوری‌های پیش تیمار، افزایش دسترسی آنزیم‌ها به زیست توده و به دست آوردن قندهای قابل تخمیر است [۸]. از این رو پیش فراوری می‌تواند قابلیت تجزیه پذیری مواد را افزایش دهد. این پدیده توسط باز نمودن پیوندهای محکم هیدروژنی بین زنجیره‌های پلیمری و در نتیجه افزایش دسترسی آنزیم‌های تجزیه کننده به سلولز و همی سلولز انجام می‌گیرد در نتیجه مواد دیر هضم با سرعت بالاتری تجزیه شده و راندمان بالاتری خواهیم داشت [۴]. روش‌های پیش فراوری را می‌توان به‌طور کلی به: روش‌های فیزیکی (آسیاب کردن و خرد سازی مکانیکی)، روش‌های فیزیکی شیمیایی (انفجار بخار و تخریب بافت آمونیاک)، روش‌های شیمیایی (مانند اسید رقیق و باز)، روش‌های بیولوژیکی و گرمایی، پیش تیمار توسط ازن [۴] و یا ترکیبی از این روش‌ها تقسیم کرد. همه‌ی روش‌های ذکر شده هزینه‌های ناشی از تبدیل بیولوژیکی ترکیبات لیگنوسلولوزی به سوخت را کاهش می‌دهند [۱۰]. پیش تیمار فراصوت موجب شکست در ساختار ترکیبات ماده سوبسترا به منظور آسان نمودن تجزیه آن توسط میکروارگانیسم‌ها برای تولید گاز متان و دی اکسید کربن در طول فرآیند هضم بی‌هوازی است و تخریب دیواره‌ی سلولی ماده سوبسترا از عمده ترین اهداف اعمال فراصوت می‌باشد که منجر به بهبود مرحله آبکافت (هیدرولیز) می‌شود [۹]. تخلیه الکتریکی در حقیقت روشی است که با آن می‌توان پلاسما تولید نمود. اصطلاح تخلیه الکتریکی گاز، از فرآیند تخلیه یک خازن در مداری شامل دو الکترود با فاصله مشخص نشأت گرفته است. اگر ولتاژ به حد کافی بالا باشد شکست الکتریکی رخ داده گاز یونیزه می‌شود و پلاسما تولید می‌گردد [۷]. گونه‌های بسیار واکنش پذیر تولید شده توسط پلاسما، پتانسیل

اکسیداسیون بالایی دارند و به خوبی شناخته شده‌اند که پیوندهای دوگانه کربن را در زیست توده لیگنوسولولزیک می-شکنند [۱۸].

در مطالعه ای برای بهبود بازیابی بیودیزل از ریز جلبک سبز *Chlorella vulgaris* از طریق پیش تیمار دوز کم پلاسما سرد در فشار جو (CAPP) استفاده شد [۵]. در پژوهشی دیگر قرار گرفتن در معرض پلاسما منجر به اثرات مخرب، وابسته به دوز و گونه های خاص بر روی ریز جلبک های یوکاریوتی شد [۱۵]. استفاده از پیش تیمار فراصوت به عنوان یک روش کارگشا در کاهش مدت زمان هضم در تصفیه فاضلاب های شهری و صنعتی، به اثبات رسیده است [۱۲]. در یک مطالعه اثر زمان اعمال پیش تیمار فراصوت بر روی فضولات دامی و پسماند های ذرت جهت افزایش بهره وری تولید زیست گاز مورد بررسی قرار گرفت [۱۹]. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر پیش تیمار غیر حرارتی و غیر شیمیایی بر عملکرد هضم بی هوازی پسماند کاه کلزا می باشد.

مواد و روش ها

در این مطالعه، آزمایش ها در آزمایشگاه انرژی های تجدید پذیر گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. از روش آزمون پتانسیل متان بیوشیمیایی (BMP) برای سنجش گاز زیستی تولیدی استفاده شد. جامدات کل (TS)، کل جامدات فرار (TVS) بر اساس روش های استاندارد اندازه گیری شده (APHA, AWWA, & WPCF, 1998) و برای طراحی آزمایش ها از روش شناسی سطح پاسخ (RSM) و نرم افزار Design Expert 13 استفاده می شود که در جدول ۱ اطلاعات مربوط به داده های آماری ذکر شده است. به کمک این طرح کلیه ضرایب مدل رگرسیون و اثر متقابل فاکتورها بر آورد شد.

جدول ۱- اطلاعات داده ها

نسخه فایل	13.0.1.0		
نوع مطالعه	فاکتوریل	نوع ماده	تصادفی
نوع طرح	فاکتوریل کامل	راکتورها	24.00
مدل طرح	2FI	بلوک ها	بدون بلوک
نقاط مرکزی	0.0000	زمان ساخت (ms)	60.00

همچنین فاکتورهای مربوط به آزمایش پیش تیمار آلتراسونیک در جدول ۲ و فاکتورهای مربوط به آزمایش پیش تیمار پلاسما در جدول ۳ به وضوح مشخص شده اند.

جدول ۲- فاکتورهای پیش تیمار آلتراسونیک

فاکتور	نام	واحد	نوع	نوع ماده	مینیمم	ماکزیمم
A	آلتراسونیک	دقیقه	طبقه بندی	اسمی	0 دقیقه	30 دقیقه
B	TS	%	طبقه بندی	اسمی	6%	10%

جدول ۳- فاکتورهای پیش تیمار پلاسما

فاکتور	نام	واحد	نوع	نوع ماده	مینیمم	ماکزیمم
A	پلاسما	دقیقه	طبقه بندی	اسمی	0 دقیقه	30 دقیقه
B	TS	%	طبقه بندی	اسمی	6%	10%

آزمایش در بطری‌های شیشه‌ای (شکل ۱) ۲۵۰ سی‌سی مجهز به دو سوپاپ و در داخل محفظه حرارتی (شکل ۲) و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شد.



شکل ۱- بطری شیشه‌ای



شکل ۲- محفظه حرارتی

تمام نمونه‌های مورد آزمایش توسط ترازوی دیجیتالی Electronic Balance (ساخت چین) پیش از ریخته شدن در راکتور وزن خواهند شد و توسط pH متر مدل 230sd (ساخت چین) سنجیده می‌شوند.

آزمایش در داخل ۲۴ راکتور و در دمای ۳۹ درجه سلسیوس در چهار تیمار که هر تیمار شامل چهار تکرار است به صورت طرح بلوک کاملاً تصادفی انجام شد. همچنین آب بندی راکتورها در محل اتصال سوپاپ‌ها به صورت هفتگی بررسی و رفع مشکل شدند.

طراحی اجرای آزمایش نیز با استفاده از نرم‌افزار ۱۲ Design expert صورت گرفت و نمودارهای استخراج شده از داده‌ها در هر مرحله گزارش گردید.

نتایج و بحث
پیش تیمار آلتراسونیک

یک دید کلی حاصل از نتایج آزمایش مذکور در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج

پاسخ نام	واحد	مشاهدات	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	خطای استاندارد	نسبت
R1 بیوگاز	ml	24.00	915.5	4250	2772.85	1000.79	4.64

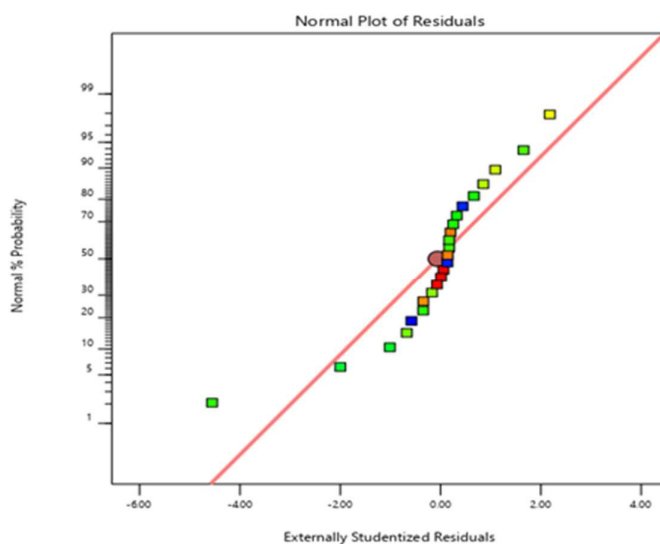
داده‌های حاصل از آزمایش مذکور در جدول ۵ نشان داده شده است. جدول ANOVA تجزیه واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به خروجی نرم‌افزار و مدل ارائه شده در جدول ۵ که برای بیوگاز است، فاکتور A، فاکتور B و اثر متقابل AB معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۵- تجزیه و تحلیل واریانس ANOVA

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-value	p-value	قابل توجه
مدل	2.112E+07	11	1.920E+06	12.03	< 0.0001	قابل توجه
A- آلتراسونیک	1.242E+07	3	4.142E+06	25.96	< 0.0001	
TS-B	6.409E+05	2	3.205E+05	2.01	0.1769	
AB	8.056E+06	6	1.343E+06	8.41	0.0010	
خطای محض	1.915E+06	12	1.596E+05			
مجموع کل	2.304E+07	23				

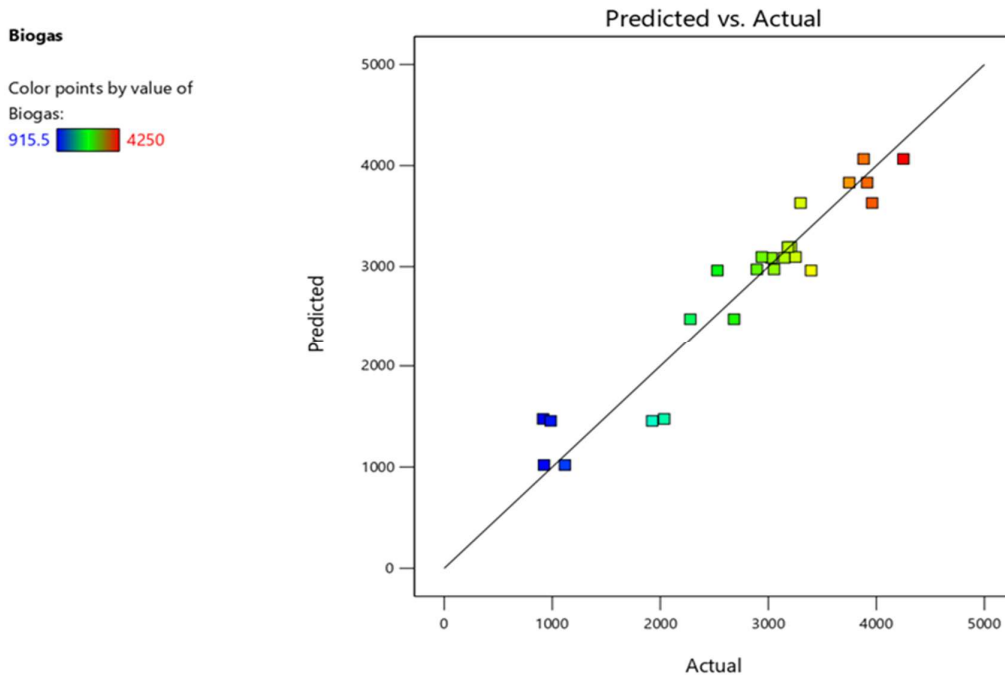
با توجه به آرایش داده‌ها در نمودار توزیع باقی مانده‌ها (شکل ۳) که همه در راستای یک خط قرار گرفته‌اند، داده‌های موردنظر از توزیع خوبی برخوردارند.

Biogas
Color points by value of
Biogas:
2630 5717



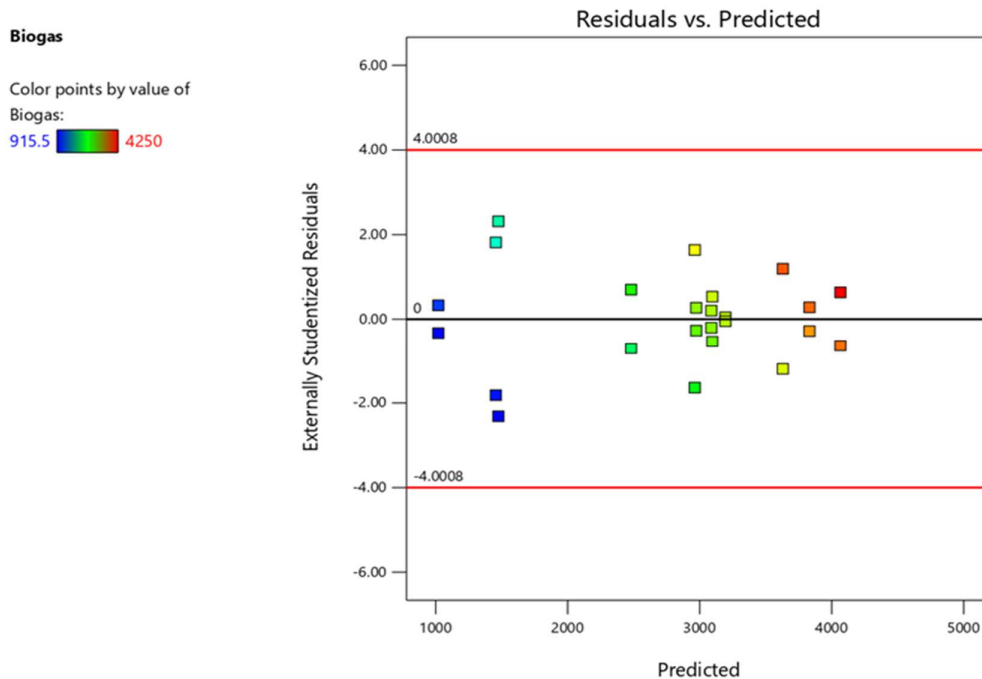
شکل ۳- نمودار توزیع باقی مانده‌ها

در شکل ۴ مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مدل آورده شده است. این نمودار مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی را برای کمک به تشخیص مقادیر یا گروهی از مقادیر که توسط مدل پیش‌بینی نشده است را نشان می‌دهد.



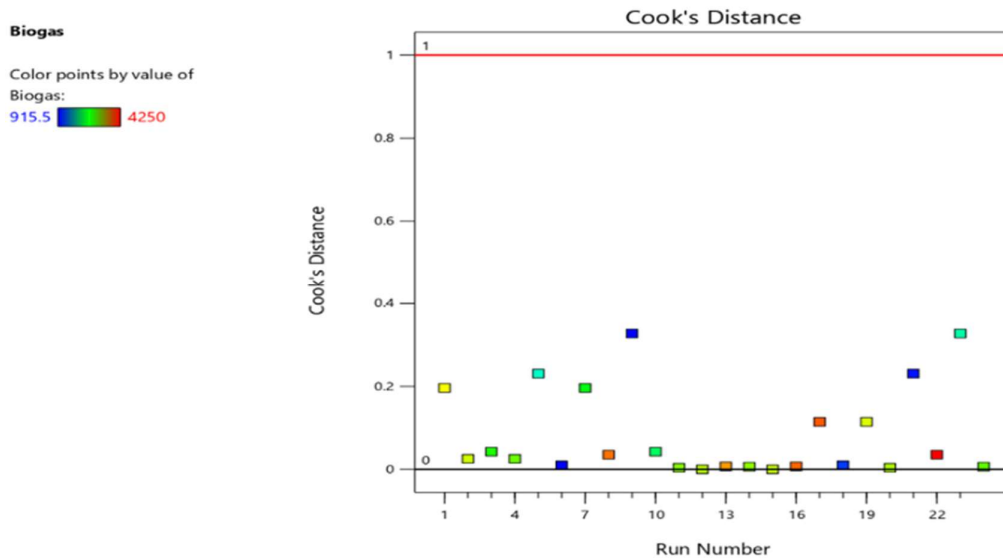
شکل ۴- نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده

شکل ۵ مقدار مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی پاسخ نشان داده و فرض واریانس ثابت را آزمون می‌کند. نمودار باید دارای پراکندگی تصادفی، که نشان‌دهنده طیف ثابت مانده در سراسر نمودار است، باشد.



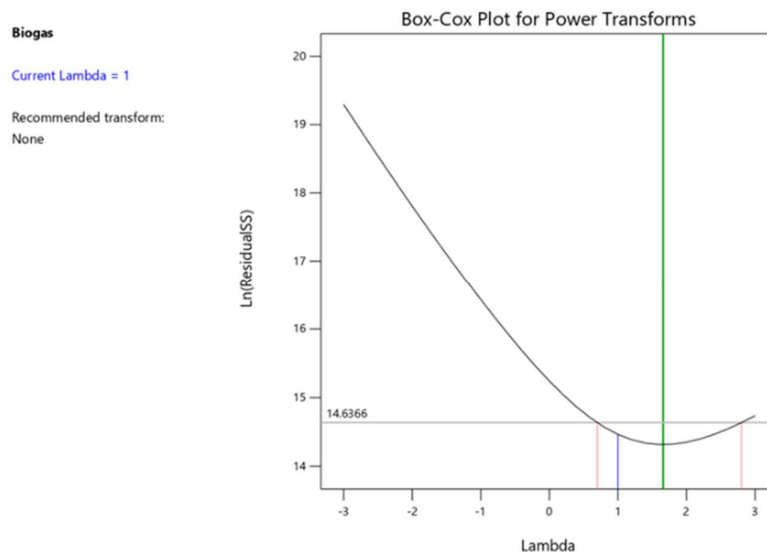
شکل ۵- نمودار باقی مانده ها در مقابل پیش بینی شده ها

با توجه به نمودار تعیین داده ی پرت، هیچ گونه داده ی پرتی مشاهده نشد. در صورتی که داده ای در اطراف و یا بالای خط قرمز نمودار باشد، آن داده به عنوان داده ی پرت شناسایی می شود. (شکل ۶).



شکل ۶- نمودار تعیین داده پرت

شکل ۷ ابزاری برای کمک به تشخیص مناسب ترین تابع انتقال توانی به منظور اعمال بر پاسخ می باشد. پایین ترین نقطه در نمودار باکس کاکس بهترین مقدار لاندا را که در آن حداقل مجموع مربعات مانده در مدل تبدیل شده ایجاد می شود را نشان می دهد. هنگامی که نسبت حداکثر به حداقل مقدار پاسخ، بزرگتر از سه باشد توانایی بیشتری در بهبود مدل با استفاده از تابع توانی وجود خواهد داشت.



شکل ۷- نمودار باکس کاکس

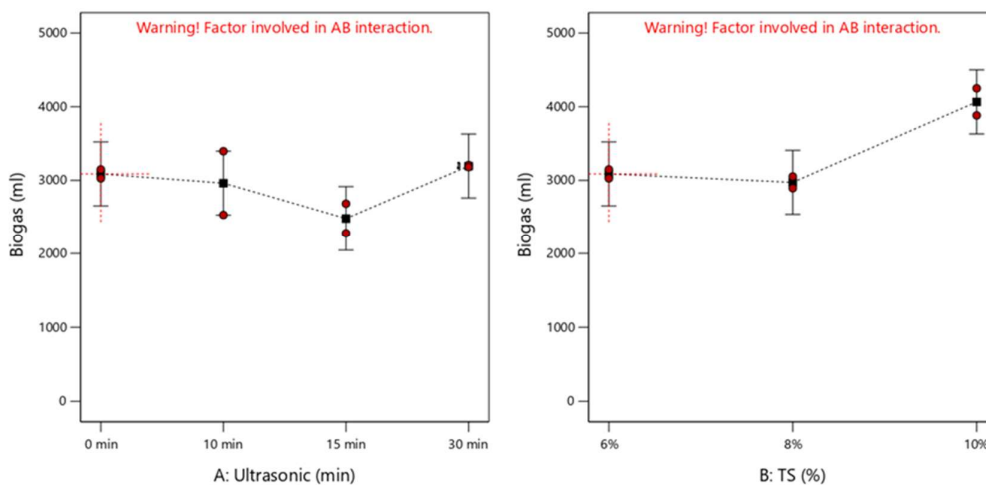
شکل ۸ تاثیر متغیرهای مستقل A و B را در متغیر وابسته که تولید بیوگاز می‌باشد، نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، پیش تیمار آلتراسونیک از شاهد تا ۱۵ دقیقه بصورت کاهشی و از ۱۵ تا ۳۰ دقیقه افزایشی و در روند تولید بیوگاز تاثیر مثبت داشت. همچنین در بررسی تاثیر TS میتوان گفت که از ۶٪ تا ۸٪ بر روند تولید بیوگاز تاثیر خاصی نداشت اما بعد از آن از ۸٪ تا ۱۰٪ تاثیر افزایشی و مثبت داشت.

اگرچه شدت فراصوت زیاد یا افزایش زمان فراصوت می‌تواند آنزیم‌ها را خنثی کند، اما نشان داده شده است که استفاده از پیش تیمار آلتراسونیک در فرکانس‌ها و سطوح مناسب می‌تواند منجر به افزایش فعالیت آنزیم شود [۱۴]، احتمالاً به این دلیل که تابش آلتراسونیک پیکربندی آنزیم را افزایش داده و در نتیجه مستقیم، فعالیت سلولز را بهبود می‌بخشد. با این حال، غیر فعال شدن سلولز نیز میتواند توسط پیش تیمار آلتراسونیک ایجاد شده و فعالیت سلولز را کاهش دهد [۱۶]. بنابراین، پیش تیمار آلتراسونیک مناسب، فعالیت سلولز را افزایش یا کاهش می‌دهد. همچنین پیش تیمار آلتراسونیک باعث کاهش محتوای اسید چرب فرار می‌شود زیرا اثر کاویتاسیون محتوی اسید چرب فرار محلول را افزایش می‌دهد. این نتیجه با نتایج سومنووک و همکاران ۲۰۱۳ یکسان بود [۱۳].

Factor Coding: Actual

Biogas (ml)
● Design Points

Actual Factors
A = 0 min
B = 6%



شکل ۸- تاثیر متغیرهای مستقل A و B بر متغیر وابسته بیوگاز

شکل ۹ مقایسه‌ی دو فاکتور A و B و اثر متقابل آنها را در نمای دو بعدی و شکل ۱۰ در نمای سه بعدی نشان می‌دهد.

Factor Coding: Actual

Biogas (ml)

● Design Points

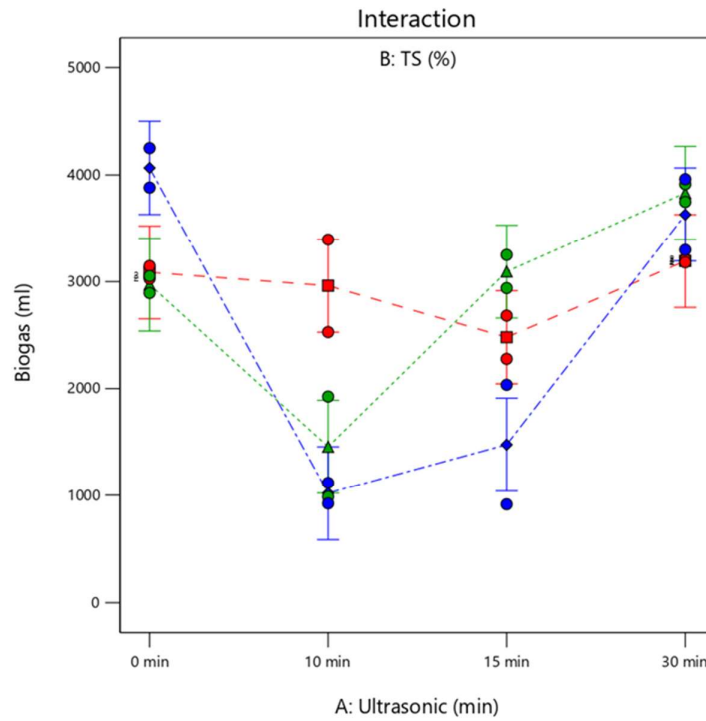
X1 = A

X2 = B

■ B1 6%

▲ B2 8%

◆ B3 10%



شکل ۹- مقایسه ی دو بعدی فاکتورهای A و B و اثر متقابل آنها

Factor Coding: Actual

Biogas (ml)

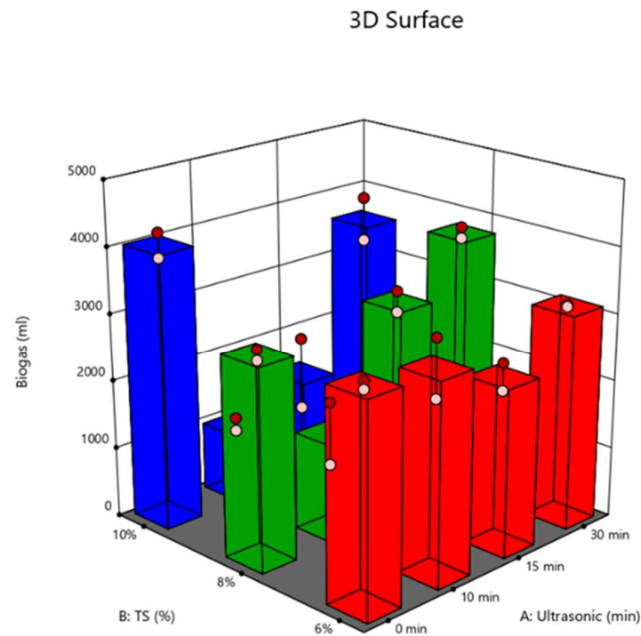
Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

X1 = A

X2 = B



شکل ۱۰- مقایسه ی سه بعدی فاکتورهای A و B و اثر متقابل آنها

پیش تیمار آلتراسونیک می تواند تولید روزانه بیوگاز را افزایش داده و کل تولید بیوگاز هضم بی هوازی را بهبود بخشد، و این با نتایج زو و همکاران ۲۰۱۶ سازگار بود [۱۹]. بر اساس این مطالعه، پنج دلیل برای این نتایج وجود داشت. ابتدا، ساختار ماده تلقیح توزیع شد و گاه کلزا بعد از پیش تیمار اولتراسونیک زبری بیشتری پیدا کرد و سطح نسبی کل سوبسترا افزایش یافت. دوم، فعالیت سلولز مایع اولیه در هضم بی هوازی بعد از پیش تیمار آلتراسونیک افزایش یافت. سوم، پیش تیمار آلتراسونیک pH مایع اولیه را در هضم بی هوازی کاهش داد و این باعث شد هضم بی هوازی زودتر به مراحل اسیدی شدن برسد. چهارم، پیش تیمار آلتراسونیک باعث حل شدن مواد محلول شد و این امر باعث تسریع در مصرف اکسیژن توسط باکتری های هوازی و بی هوازی اختیاری شد و در نتیجه فعالیت باکتری های متان را تقویت کرد. پنجم، تغییرات همبستگی فعالیت سلولز، کاهش محتوی قند، pH، و محتوای اسید چرب فرار در طول فرآیند هضم بی هوازی محیط هضم را برای هضم بی هوازی مناسب تر کرد.

پیش تیمار پلازما

ابتدا با استفاده از نمودار باکس کاکس نرمال نبودن داده ها مشخص شد سپس با استفاده از تابع انتقال پاور و با روند فرمول ۱ داده ها نرمال شدند.

فرمول ۱

$$y'=(y+k)^A$$

یک دید کلی حاصل از نتایج آزمایش مذکور در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج

پاسخ نام	واحد	مشاهدات	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	خطای استاندارد	نسبت
R1	بیوگاز ml	24.00	۲۹۲۲	۴۶۰۹	۳۵۵۰.۰۴	۵۰۶.۰۴	۱.۵۸

داده های حاصل از آزمایش مذکور در جدول ۷ نشان داده شده است. جدول ANOVA تجزیه واریانس داده ها را نشان می دهد. با توجه به مقدار F که برابر با ۲۶.۸۹ و P کمتر از ۰.۰۵۰۰، میتوان گفت که مدل قابل توجه بوده و فاکتور A، فاکتور B و اثر متقابل AB معنی دار می باشند. تنها ۰.۰۱ احتمال وجود دارد که مقدار F به این بزرگی به دلیل نویز رخ داده باشد. در این مورد B یک اصطلاح مدل معنی دار است. مقادیر بیشتر از ۰.۱۰۰۰ نشان می دهد که شرایط مدل معنی دار نیستند.

جدول ۷- تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA)

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-value	p-value
مدل	5.660E+06	11	5.146E+05	26.89	< 0.0001
A- پلاسما	45715.13	3	15238.38	0.7964	0.5192
TS-B	5.505E+06	2	2.753E+06	143.86	< 0.0001
AB	1.090E+05	6	18169.50	0.9496	0.4965
خطای محض	2.296E+05	12	19134.79		
مجموع کل	5.890E+06	23			

با توجه به جدول ۸، R^2 پیش بینی شده 0/8441 با R^2 تعدیل 0/9253 موافق است؛ یعنی تفاوت کمتر از 0/2 است. عدد دقت لازم در جدول، نسبت سیگنال به نویز را اندازه گیری می کند که نسبت بیشتر از ۴ مطلوب است. در این آزمایش نسبت ۱۴۰۹۸ سیگنال کافی و مطلوبیت مدل را نشان می دهد در نتیجه از این مدل می توان برای حرکت در فضای طراحی استفاده کرد.

جدول ۸- برازش آماری مدل های تعیین شده

انحراف معیار	138.33	R^2	0.9610
میانگین	3550.04	R^2 تعدیل	0.9253
C.V. %	3.90	R^2 پیش بینی شده	0.8441
		دقت لازم	14.0983

شکل ۱۱ تاثیر متغیرهای مستقل A و B را در متغیر وابسته که تولید بیوگاز می باشد، نشان می دهد. با توجه به نمودار، پیش تیمار پلاسما از شاهد تا ۱۰ دقیقه بصورت کاهشی، از ۱۰ تا ۱۵ دقیقه افزایشی و از ۱۵ تا ۳۰ دقیقه مجدداً بصورت کاهشی و منفی بر روند تولید بیوگاز تاثیر گذاشته است. همچنین در بررسی تاثیر TS میتوان گفت که از ۶٪ تا ۱۰٪ بر روند تولید بیوگاز تاثیر افزایشی و مثبت داشته است و در همه جا با افزایش درصد TS تولید بیوگاز نیز بیشتر شده است.

Factor Coding: Actual

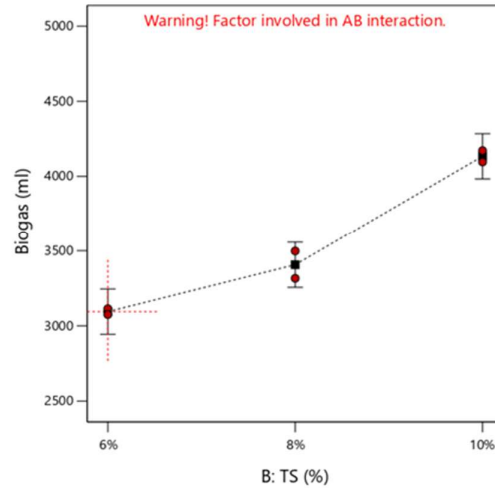
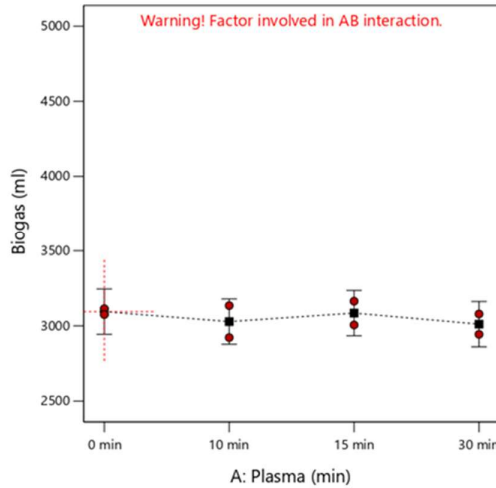
Biogas (ml)

● Design Points

Actual Factors

A = 0 min

B = 6%



شکل ۱۱ تاثیر متغیرهای مستقل A و B بر متغیر وابسته بیوگاز

شکل ۱۲ مقایسه ی دو فاکتور A و B را در نمای دو بعدی و شکل ۱۳ در نمای سه بعدی نشان می دهد.

Factor Coding: Actual

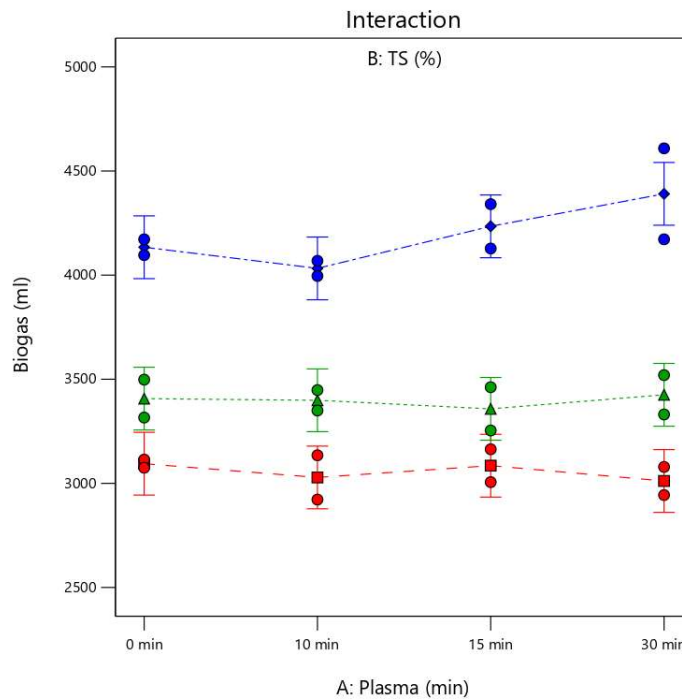
Biogas (ml)

● Design Points

X1 = A

X2 = B

■ B1 6%
▲ B2 8%
◆ B3 10%



شکل ۱۲- مقایسه ی دو بعدی فاکتورهای A و B و اثر متقابل آنها

Factor Coding: Actual

3D Surface

Biogas (ml)

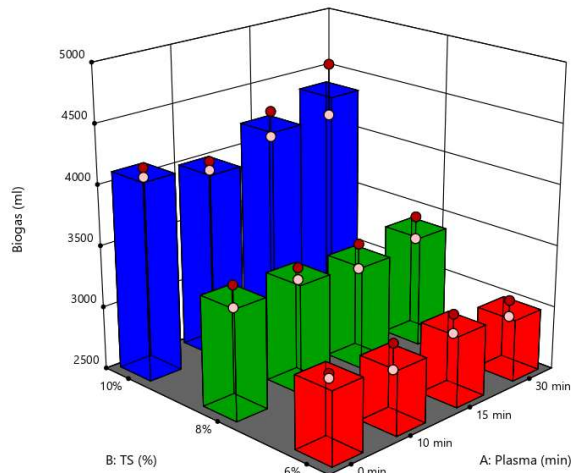
Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

X1 = A

X2 = B



شکل ۱۳- مقایسه ی سه بعدی فاکتورهای A و B

نتیجه گیری

نتیجه تجزیه و تحلیل عاملی نشان داد که عوامل اصلی موثر بر تولید بیوگاز تحت تأثیر پیش تیمار آلتراسونیک قرار دارند و بر اساس مراحل مختلف هضم متفاوت هستند. این تحقیق به این نتیجه رسید که پیش تیمار آلتراسونیک تولید کل بیوگاز را از طریق تغییر محیط اولیه هضم بی هوازی و محیط طی فرآیند هضم بهبود می بخشد، این تغییرات محیط را برای هضم بی هوازی مناسب تر می کند. این نتایج با نتایج زو و همکاران ۲۰۱۶ هم خوانی داشت. عوامل اصلی موثر بر تولید بیوگاز در نمونه های مختلف پیش تیمار شده متفاوت بودند، این نتیجه به دست آمد که تغییرات همبستگی فعالیت سلولز، کاهش محتوی قند، PH و محتوای اسید چرب فرار در طول فرآیند هضم بی هوازی محیط هضم را برای هضم بی هوازی مناسب تر می کند. همچنین در آزمایش پیش تیمار پلاسما، افزایش درصد TS با تولید بیوگاز رابطه ی مستقیم داشت و ۱۰٪ TS بیشترین میزان تولید بیوگاز را دارا بود اما در کل می توان گفت تأثیر پیش تیمار پلاسما در افزایش تولید بیوگاز از نظر آماری معنی دار نبود.

مراجع:

۱. چراغی، م. کریمی، م. (۱۳۹۲). "بهینه‌سازی هیدرولیز آنزیمی کاه کلزا با استفاده از پیش تیمار ماکروویو مواد شیمیایی." پایان‌نامه دانشکده علوم و صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۲. حاجی آقا علیزاده، ح. سیفی، ر. و رادمرد، ع. (۱۳۹۵). "بررسی تولید متان از پسماند مواد غذایی با استفاده از تابش مایکروویو: تاثیر توان و زمان تابش و ارائه سینتیک فرآیند." *مجله دانشکده علوم پزشکی مازندران*، ۲۶، صفحه ۱۷۰-۱۸۰: شماره ۱۳۸.
۳. میر محمد، ص. (۱۳۹۴). "پیش‌فراوری شیمیایی مواد لیگنوسلولوزی به منظور بهبود تولید بیوگاز به روش تخمیر فاز جامد." پایان‌نامه دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان.
۴. Ahmadi, M., Latibari, A. J., Faezipour, M., and Hedjazi, S. 2010. Neutral sulfite semi-chemical pulping of rapeseed residues. *Turkish Journal of Agriculture and forestry*, 34(1): 11-16.
۵. Almarashi, J. Q., El-Zohary, S. E., Ellabban, M. A., and Abomohra, A. E.-F. 2020. Enhancement of lipid production and energy recovery from the green microalga *Chlorella vulgaris* by inoculum pretreatment with low-dose cold atmospheric pressure plasma (CAPP). *Energy Conversion and Management*, 204: 112314.
۶. Heiske, S., Schultz-Jensen, N., Leipold, F., and Schmidt, J. E. 2013. Improving anaerobic digestion of wheat straw by plasma-assisted pretreatment. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2013.
۷. Kong, M. G., Kroesen, G., Morfill, G., Nosenko, T., Shimizu, T., Van Dijk, J., and Zimmermann, J. 2009. Plasma medicine: an introductory review. *new Journal of Physics*, 11(11): 115012.
۸. Li, D., Huang, X., Wang, Q., Yuan, Y., Yan, Z., Li, Z., . . . Liu, X. 2016. Kinetics of methane production and hydrolysis in anaerobic digestion of corn stover. *Energy*, 102: 1-9.
۹. Montgomery, L. F., & Bochmann, G. 2014. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production: IEA Bioenergy Ireland.
۱۰. Mood, S. H., Golfeshan, A. H., Tabatabaei, M., Jouzani, G. S., Najafi, G. H., Gholami, M., and Ardjmand, M. 2013. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27: 77-93.
۱۱. Ramirez-Bribiesca, J., Wang, Y., Jin, L., Canam, T., Town, J., Tsang, A., . . . McAllister, T. 2011. Chemical characterization and in vitro fermentation of Brassica straw treated with the aerobic fungus, *Trametes versicolor*. *Canadian Journal of Animal Science*, 91(4): 695-702.
۱۲. Rasapoor, M., Ajabshirchi, Y., Adl, M., Abdi, R., and Gharibi, A. 2016. The effect of ultrasonic pretreatment on biogas generation yield from organic fraction of municipal solid waste under medium solids concentration circumstance. *Energy Conversion and Management*, 119: 444-452.
۱۳. Somnuk, K., Smithmaitrie, P., and Prateepchaikul, G. 2013. Optimization of continuous acid-catalyzed esterification for free fatty acids reduction in mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity ultrasonic irradiation. *Energy Conversion and Management*, 68: 193-199.
۱۴. Subhedar, P. B., and Gogate, P. R. 2014. Enhancing the activity of cellulase enzyme using ultrasonic irradiations. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 101: 108-114.
۱۵. Tang, Y. Z., Lu, X. P., Laroussi, M., and Dobbs, F. C. 2008. Sublethal and killing effects of atmospheric-pressure, nonthermal plasma on eukaryotic microalgae in aqueous media. *Plasma Processes and Polymers*, 5(6): 552-558.
۱۶. Wang, Z., Lin, X., Li, P., Zhang, J., Wang, S., and Ma, H. 2012. Effects of low intensity ultrasound on cellulase pretreatment. *Bioresource Technology*, 117: 222-227.
۱۷. Wright, A., Bandulasena, H., Ibenegbu, C., Leak, D., Holmes, T., Zimmerman, W., . . . Iza, F. 2018. Dielectric barrier discharge plasma microbubble reactor for pretreatment of lignocellulosic biomass. *AIChE Journal*, 64(11): 3803-3816.
۱۸. Yousefi, H. 2009. Canola straw as a bio-waste resource for medium density fiberboard (MDF) manufacture. *Waste management*, 29(10): 2644-2648.
۱۹. Zou, S., Wang, X., Chen, Y., Wan, H., and Feng, Y. 2016. Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion by ultrasonic pretreatment. *Energy Conversion and Management*, 112: 226-235.

Comparison of the effect of cold plasma and ultrasonic pretreatments on anaerobic digestion performance of canola straw waste in a batch reactor

Zahra Malmir¹, Hosein Haji Agha Alizadeh^{1*}, and Majid Rasouli¹

1. Biosystems Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Abstract

In this study, the effect of non-thermal and non-chemical pretreatment on the anaerobic digestion performance of rapeseed straw waste, which is a lignocellulosic material, was investigated. Biochemical methane potential test was used to perform the experiments. Data analysis was performed in a complete factorial design using Design Expert13 software. The results showed that ultrasonic pretreatment improved total biogas production by changing the initial environment of anaerobic digestion and changing the structure of cellulose. The main factors affecting biogas production were different in different pretreated samples and changes in the correlation between cellulose activity, decrease in sugar content, pH and volatile fatty acid content during the anaerobic digestion process made the environment more suitable for anaerobic digestion. Also, in plasma pretreatment experiment, increasing the percentage of TS was directly related to biogas production and TS = 10% had the highest biogas production, but in general it can be said that the effect of plasma pretreatment on increasing biogas production was not statistically significant.

Keywords: Anaerobic digestion, lignocellulosic waste, renewable energy, waste management.

*Corresponding author

E-mail: h-alizade@basu.ac.ir