

بهینه‌سازی متغیرهای دما و زمان پیش‌تیمار حرارتی و غلظت مواد آلی به‌منظور تولید بیشینه متان در هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی

سید مسعود کمالی^۱، رضا عبدی^{۱*}، عباس روحانی^۲، شمس الله عبدالله‌پور^۱ و سیروس ابراهیمی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۷

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

* مسئول مکاتبه: rezaabdi685@gmail.com

چکیده

هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی دارای مشکلاتی همچون کند بودن فرآیند و در نتیجه نیاز به حجم زیاد راکتور، عدم تولید متان کافی برای تامین انرژی مورد نیاز فرآیند و همچنین عدم اطمینان از سلامت مواد هضم شده برای استفاده در اراضی کشاورزی به عنوان کود آلی است. پیش‌تیمار حرارتی پسماندهای آلی می‌تواند به عنوان روشی برای حل مشکلات مطرح شده در خصوص فرآیند هضم بی‌هوازی در نظر گرفته شود. از سوی دیگر محققین بسیاری اعمال دماهای بالا به‌منظور پیش‌تیمار انواع مواد آلی مانند پسماندهای غذایی که به سهولت قابل تجزیه هستند را به دلیل تاثیر نامطلوب در فرآیند هضم و کاهش تولید متان توصیه نمی‌کنند. در این تحقیق تاثیر پارامترهای مستقل شامل دمای پیش‌تیمار در سه سطح ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس، زمان پیش‌تیمار در سه سطح ۳۰، ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه و غلظت در سه سطح ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد بر روی میزان تولید متان بررسی شدند. به‌منظور بهینه‌سازی این پارامترها، مدل‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ و در قالب طرح باکس بنکن انجام و سپس از الگوریتم ژنتیک برای یافتن سطوح بهینه متغیرهای مورد بررسی بهره‌گیری شد. نتایج بهینه‌سازی فرآیند پیش‌تیمار حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان داد که مطلوب‌ترین مقادیر مربوط به دما و زمان پیش‌تیمار و غلظت مورد بررسی به ترتیب ۹۶ درجه سلسیوس و ۹۵ دقیقه و ۱۲ درصد بوده‌اند. میزان مورد انتظار تولید متان بر اساس الگوریتم ژنتیک با اعمال شرایط بهینه دما و زمان پیش‌تیمار و غلظت برابر ۳۵۴ میلی‌لیتر به ازای هر گرم ماده آلی فرار بوده که مطابقت خوبی با میزان واقعی متان حاصل شده پس از اعمال این پیش‌تیمار بر پسماندهای آلی داشته است (۴/۵۸ ± ۳۴۷).

واژه‌های کلیدی: پیش‌تیمار حرارتی، هضم بی‌هوازی، طرح باکس بنکن، بهینه‌سازی

Optimization of Thermal Pre-treatment Temperature and Time and Material Concentration to Maximize Methane Production in Anaerobic Digestion of Organic Waste

Seid Masuod Kamali¹, Reza Abdi^{1*}, Abbas Rouhani², Shamsollah Abdolapour¹ and Syrous Ebrahimi³

Received: 27 April 2021

Accepted: 16 June 2021

¹Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Ferdowsi Mashhad, Mashhad, Iran

³Department of Chemical Engineering Chemical Engineering Faculty Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

*Corresponding author: rezaabdi685@gmail.com

Abstract

Anaerobic digestion of municipal organic waste faces numerous challenges. This process is often lengthy, requires a large reactor volume and produces insufficient methane to supply the process energy need, as well as uncertain digestate to be utilized in farmlands. Thermal pretreatment sometimes can be considered as an efficient method to address these problems. Many researchers, on the other hand, suggest that applying high temperature thermal pretreatment for easily biodegradable organics such as food waste will result in reduced methane production. In the current study, the contribution of the independent variables, including pretreatment temperature at 70, 90 and 110 °C, pretreatment duration of 30, 75 and 120 minutes as well as the digestible concentration at 8, 12 and 16% to methane production were considered. To optimize the aforementioned variables, modeling was conducted using Box-Behnken design followed by Genetic Algorithm to find the optimal quantities for mentioned parameters. The results of Genetic Algorithm revealed that the optimum pretreatment temperature and time and organic concentration to achieve the highest amount of methane from anaerobic digestion of organic waste would be 96 °C, 95 minutes and 12%. The predicted amount of methane applying the optimal conditions of temperature and pretreatment time and solid content resulting from Genetic Algorithm was 354 mL per gram of volatile solids. This value was in a good agreement with the actual amount of methane obtained applying these pretreatment conditions to organic wastes (354 ± 4.58).

Keywords. Anaerobic Digestion, Box-Behnken Design, Optimization, Thermal Pretreatment

How to cite:

Kamali, S. M., Abdi, A., Rouhani, A., Abdolapour, Sh., and Ebrahimi, S. 2020. Optimization of Thermal Pre-treatment Temperature and Time and Material Concentration to Maximize Methane Production in Anaerobic Digestion of Organic Waste. Journal of Agricultural Mechanization 5 (2): 69-79.

۱- مقدمه

هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی به‌منظور تولید متان، به دلیل فراهم کردن سوختی پاک از مواد تجدیدپذیر سودمند بوده (Gupta et al, 2012) و می‌تواند مصرف سوخت‌های فسیلی و آثار سوء زیست‌محیطی ناشی از مصرف این سوخت‌ها مانند گرمایش جهانی و باران‌های اسیدی را کاهش دهد (Chynoweth, 2011).

در شهرهای ایران میزان مواد آلی در حدود ۷۵ درصد کل پسماند شهری تولیدی است در حالیکه در کشورهای توسعه‌یافته مثلاً در ایالات متحده این مواد تنها ۲۵ درصد پسماند شهری را تشکیل داده است. به‌دلیل محتوای بالای انرژی پسماندهای غذایی، استحصال متان از این پسماندها مفید خواهد بود. ضمناً مواد تثبیت شده خروجی فرایند می‌تواند به عنوان کود غنی از نیتروژن و فسفر استفاده گردد (Maghanaki et al. 2013).

تخمین زده شده است که فرایند هضم بی‌هوازی قادر به تولید ۲ تا ۴ برابر متان در مدت سه هفته به ازای هر تن پسماند شهری نسبت به متان تولید شده از دفن همین مقدار پسماند در مدت ۶ تا ۷ سال است (Saxena et al. 2009). با این حال استفاده از روش‌های پیش‌فرآوری با هدف ارتقاء بازده فرایند هضم بی‌هوازی می‌تواند بکارگیری این تکنولوژی را جذاب‌تر نماید.

اخیراً بیشتر تحقیقات بر روش‌های پیش‌فرآوری مواد در سیستم‌های تصفیه فاضلاب، لجن و یا مواد لیگنوسلولوزی صورت گرفته است و تنها تعداد محدودی از محققین روش‌های پیش‌فرآوری پسماندهای آلی بویژه بخش آلی پسماندهای جامد شهری به‌منظور هضم بی‌هوازی را بررسی نموده‌اند. بر اساس یک ارزیابی پایداری ساده، پیش‌تیمار حرارتی و هاضم دو مرحله‌ای به عنوان پایدارترین روش‌ها برای بهبود هضم بخش آلی پسماندهای جامد شهری ارزیابی شدند. مزیت این روش‌ها عبارتند از: بازده بیشتر تولید بیوگاز، حذف موثر پاتوژن‌ها، کاهش مواد جامد باقیمانده از هضم، تراز انرژی بالاتر و توجه اقتصادی بهتر. روش‌های مرسوم زیستی و روش‌های مکانیکی در رتبه‌های بعدی واقع شده‌اند (Ariunbaatar et al. 2014).

پیش‌تیمار حرارتی حذف عوامل بیماری‌زا را بدنال داشته و برای اعمال این پیش‌تیمار نیازی به اضافه کردن هیچگونه مواد شیمیایی

نیست و در نتیجه دفع مواد باقیمانده پس از هضم بی‌هوازی کم‌هزینه‌تر خواهد بود (Scherzinger & Kaltschmitt, 2021).

پیش‌فرآوری حرارتی لجن اولیه و ثانویه تاسیسات تصفیه فاضلاب در 70°C آثار مختلفی بر پتانسیل تولید متان ناشی از هضم ترموفیلیک و مزوفیلیک داشت. مشخص شد که پیش‌فرآوری در 70°C دارای اثر مثبت در هضم مزوفیلیک لجن اولیه بوده، اما برای هضم ترموفیلیک موثر نبوده است. این در حالی است که پیش‌فرآوری لجن ثانویه در این دما در هر دو نوع هضم مزوفیلیک و ترموفیلیک تولید متان را افزایش داد. این موضوع با توجه به ترکیب شیمیایی پسماندهای آلی قابل توضیح است: لجن اولیه حاوی مقادیر بیشتری کربوهیدرات است در حالیکه لجن ثانویه پروتئین و لیپید بیشتری دارد (Raposo et al. 2011). برخی محققین به 50% افزایش تولید بیوگاز با اعمال دمای 70°C پیش از هضم ترموفیلیک دست یافتند (Climent et al. 2007). با توجه به مباحث ذکر شده و با عنایت به وجود مقادیر قابل‌توجه مواد آلی تجزیه‌پذیر در جریان پسماند شهری کشور و آثار مطلوب پیش‌تیمار حرارتی به‌منظور از بین بردن عوامل بیماری‌زا و قابلیت استفاده مطمئن از زیست‌توده باقیمانده از فرایند هضم برای مصارف کشاورزی و اصلاح بافت خاک و همچنین اثر این پیش‌تیمار بر غشاء سلولی مواد آلی، در این تحقیق پیش‌فرآوری حرارتی به عنوان روشی اقتصادی و زیست‌محیطی مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق، بررسی و مدل‌سازی روند تولید متان از بخش آلی پسماندهای شهری تحت پیش‌فرآوری حرارتی در دماهای متوسط و غلظت‌های مختلف که قابلیت کاربرد در مقیاس واقعی را داشته باشد، و همچنین دستیابی به مقادیر بهینه این متغیرها بوده است، از روش سطح پاسخ باکس‌بنکن^۱ و بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به این هدف استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مورد استفاده

ترکیب مواد مورد استفاده در این تحقیق، با توجه به نوع مواد آلی موجود در پسماندهای جامد شهری و با هدف مقایسه‌پذیری و افزایش قابلیت اطمینان نتایج، متشکل از اجزاء مشخص و ثابتی مطابق جدول ۱ برای کلیه آزمایش‌ها بوده است.

جدول ۱- ترکیب پسماند مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table1. Components of the waste used in the essay

ردیف No	نوع پسماند آلی Organic waste material	درصد Percentage
1	ضایعات سیب‌زمینی، پوست موز و پسماندهای سبزیجات و کاهو Potato waste, banana peel, vegetable and lettuce leftover	40
2	ضایعات گوجه، پیاز، خیار، هویج، بادنجان، فلفل دلمه‌ای، کدو تنبل و کلم tomato, onion, cucumber, carrot, eggplant, bell pepper, zucchini and cabbage	40
3	ضایعات نان و شیرینی، فراورده‌های گوشتی و لبنی، برنج پخته، کاغذ و دستمال کاغذی و سایر مواد شامل چای، پوسته تخم‌مرغ، آجیل و خرما و روغن tissue paper, Bread and bakery, meat product, dairy product, steamed rice, paper and and miscellaneous materials including tea, eggshell, walnut, date, and oil	20

^۱ Box-Behnken Design (BBD)

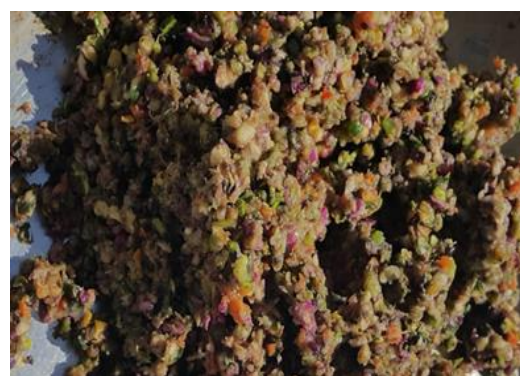
زمان استفاده در دمای ۳۵ درجه سلسیوس در شرایط بی‌هوازی به گونه‌ای که خللی برای ادامه فعالیت‌های میکروب‌های بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز پیش نیاید نگهداری شد (Angelidaki et al, 2009). این عملیات تا زمانی که تولید گاز از مواد تلقیحی به پایان برسد (حداکثر ۷ روز) ادامه یافت. جدول ۲ ویژگی‌های مواد آلی و ماده تلقیحی مورد استفاده در این تحقیق پیش از تنظیم محتوای رطوبت را نشان می‌دهد.



شکل ۲- افزایش غلظت لجن تلقیح

Fig 2. Increase in inoculum concentration

پس از تهیه این مواد و کاهش اندازه و اختلاط آنها، اندازه این مواد توسط خردکن به کمتر از ۲ میلی‌متر کاهش یافته (شکل ۱) و با اختلاط مجدد تا حد امکان یکنواخت و پیش از انجام پیش‌فرآوری حرارتی، حداکثر به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۴ درجه سلسیوس در ظروف در بسته در یخچال نگهداری شدند. مواد خروجی از هاضم بی‌هوازی موجود در پژوهشگاه مواد و انرژی، به عنوان مایه تلقیح فرآیند هضم مورد استفاده قرار گرفت. قطعات درشت‌تر از ۲ میلی‌متر موجود در این لجن حذف شده و به‌منظور افزایش غلظت آن به ۱۶ درصد (شکل ۲)، دستگاه سانتریفوژ بکار گرفته شد. مواد تلقیحی تا



شکل ۱- پسماند آلی خرد شده

Fig 1. Shredded organic waste

جدول ۲- مشخصات کلی مواد آلی و ماده تلقیحی مورد استفاده
2. Characteristics of the synthetic OFMSW and the inoculum Table

ماده	محتوای مواد جامد	محتوای مواد جامدفرار	اسیدچرب فرار	اسیدیته
Material	TS (wt %)	VS (wt %)	VFA (mg-L ⁻¹)	pH
مواد آلی پسماند (OFMSW)	0.17± 18.85	0.85 ± 91.88	149.73± 4219.85	0.04 ±5.63
ماده تلقیحی Inoculum	0.42 ±16.89	0.57 ± 62.28	57.24 ± 621.43	0.06 ± 8.67

و ۱۲۰ دقیقه) و دماهای موردنظر (۷۰، ۹۰ و ۱۱۰) قرار گرفته و سپس با نسبت ۱ به ۲ بر اساس گرم ماده فرار موجود ($grVS_{Substrate}/grVS_{Inocula}$) با ماده تلقیحی ترکیب و کاملاً یکنواخت شده و به میزان مشخص درون بطری‌های شیشه‌ای با ظرفیت کاری ۱۰۰ سی‌سی ریخته شدند.

هاضم‌های آزمایشی در این تحقیق مطابق مدل مورد استفاده MC Leod et al. (2015) راه‌اندازی شدند. مجموعه‌های هاضم برای اندازه‌گیری متان تولیدی شامل بطری مواد هضم‌شونده، بطری حاوی محلول ۳ مولار هیدروکسید سدیم برای جذب گازهای دی‌اکسیدکربن و سولفید هیدروژن، بطری آب و بطری خالی برای جمع‌آوری آب بر

۲-۲- اندازه‌گیری پارامترهای موثر در فرآیند

برخی ویژگی‌های مواد اولیه که در هضم بی‌هوازی موثر است شامل میزان درصد رطوبت و مواد جامد کل و درصد مواد جامد فرار اندازه‌گیری شدند (APHA^۱, 2012).

۲-۳- راه‌اندازی هاضم‌های آزمایشی و اندازه‌گیری متان تولیدی

پس از تنظیم رطوبت مواد هضم‌شونده در غلظت‌های مورد مطالعه ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد، این مواد تحت پیش‌تیمار حرارتی در زمان‌ها (۳۰، ۷۵

^۱ American Public Health Association

داده‌ها صورت گرفت. برازش مدل رگرسیون با ضریب تبیین R^2 برای تعیین اینکه چند درصد از تغییرات می‌تواند توسط مدل شرح داده شود، بررسی شد. آزمون F برای تعیین معنی‌داری مدل کلی انجام شد. از نرم افزار Design Expert 10 به منظور تجزیه و تحلیل اطلاعات و رسم نمودارها استفاده شد.

در این پژوهش پس از استخراج مدل تغییرات بازده متان بر حسب متغیرهای مربوطه، به کمک الگوریتم ژنتیک، سطوحی از این متغیرها که تولید متان را بیشینه می‌کند مشخص شد. بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک از طریق کدنویسی در برنامه مطلب انجام شد و پس از تجزیه و تحلیل با استفاده از نرم‌افزارهای آماری، مدل سطح پاسخ نیز استخراج شد.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق مدل‌سازی تولید متان با توجه به سه عامل زمان و دمای پیش‌فرآوری و غلظت مواد با استفاده از طرح آماری باکس-بنکن و یافتن مقادیر بهینه برای این فاکتورها با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک انجام شد.

۳-۱- مدل‌سازی تولید متان و ارزیابی مدل

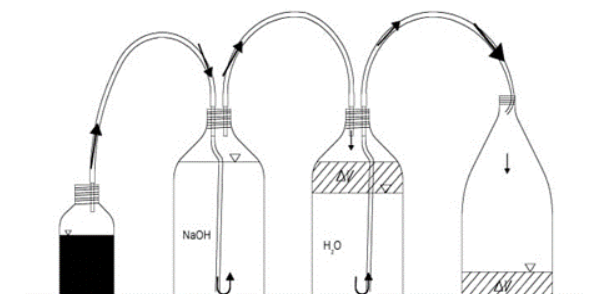
متان تولیدی ناشی از هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی در غلظت‌های مختلف که تحت پیش‌تیمارهای مختلف حرارتی مشخص قرار گرفته بودند تا زمانی که متانی در سه روز متوالی تولید نشد اندازه‌گیری و به عنوان متان تجمعی برای تحلیل آزمایش‌ها با طرح باکس-بنکن در نظر گرفته شدند.

با توجه به جدول ۳ عملکرد مدل درجه دوم و درجه دوم کاهش‌یافته اختلاف ناچیزی با هم داشته و بنابراین برای سادگی کار از مدل درجه دوم کاهش‌یافته که دارای جملات کمتری در مدل است برای پیش‌بینی میزان تولید متان استفاده شد. این مطلب نشانگر تاثیر ناچیز اثرهای متقابل در مدل تخمین متان بوده و در نتیجه مدل درجه ۲ کاهش‌یافته با حداکثر خطای ۱/۶۳ درصد به عنوان بهترین مدل به‌منظور توجیه تغییرات پاسخ (میزان تولید متان) تحت پیش‌تیمار حرارتی در زمان‌ها و دماها و غلظت‌های مورد بررسی انتخاب شده و قابلیت پیش‌بینی متان را خواهد داشت.

پس از انتخاب مدل درجه دو کاهش‌یافته به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی تولید متان، آزمونی برای انواع تبدیل متغیرها برای دستیابی به مطلوب‌ترین نتیجه انجام شد. جدول ۴ نتایج ارزیابی تبدیلات مختلف را نشان می‌دهد.

با توجه به مقدار R^2 و میزان خطا (RMSE) و درصد خطا (MAPE) در جدول ۴ می‌توان استنباط نمود که انواع این تبدیلات تاثیر ناچیزی در بهبود پیش‌بینی مدل دارند بنابراین این نتایج موید این مطلب است که نیاز به هیچ گونه تغییر متغیری نخواهد بود. در نتیجه رابطه $y = f(x)$ برای دستیابی به بهترین نتایج انتخاب شد.

اساس میزان متان تولیدی بوده است. به این ترتیب هضم بی‌هوازی تیمارهای متعدد از مواد پیش‌فرآوری شده در سه غلظت مختلف در انکوباتور تحت شرایط مزوفیلیک در مدت چهار هفته انجام گرفت. شکل ۳ آرایش قرارگیری راکتور و ظروف آب و NaOH را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مجموعه هاضم برای اندازه‌گیری متان تولیدی

Fig 3. Biomethane measurement setup

۲-۴- طراحی آزمایش‌ها

نظر به اینکه هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی تولید متان تحت تاثیر پارامترهای مستقل زمان و دمای پیش‌تیمار و غلظت و بهینه‌سازی این پارامترها است از روش سطح پاسخ باکس-بنکن برای رسیدن به این هدف استفاده شد. طرح آزمایشی باکس-بنکن برای ارزیابی آثار اصلی و متقابل دمای پیش‌تیمار، زمان اعمال پیش‌تیمار و غلظت بر بازده متان و تعیین حالتی که در آن تولید متان حداکثر خواهد بود استفاده شد. طرح باکس-بنکن در این تحقیق شامل سه متغیر مستقل در سه سطح بوده است. در این پژوهش بر اساس تحقیقات قبلی، دماها و زمان‌های بکاررفته متناسب با شرایط پسماندهای آلی غذایی تعیین شده است. نتایج جدول باکس-بنکن (بازده متان) برای تشکیل جدول ANOVA و آنالیز رگرسیون چندگانه در نرم‌افزار (Design Expert) بکار رفت. همچنین معادله مدل چندجمله‌ای که پیش‌بینی درجه بیشینه بازده متان و متعاقباً متغیرهای بهینه آن را ممکن می‌سازد استفاده شد. نتایج آزمایش در دیاگرام سه‌بعدی سطح پاسخ که ارتباط بین دو پارامتر و بازده متان را نشان می‌دهد، نمایش داده شد.

مدل ریاضی تولید متان به عنوان متغیر وابسته در این طرح به صورت رابطه (۱) است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ji} X_i X_j \quad (1)$$

پس از این مرحله آنالیز واریانس (ANOVA) که ابزار ضروری برای تست معنی‌دار بودن و کفایت مدل است و همچنین آنالیز رگرسیون

جدول ۳- نتیجه ارزیابی مدل‌های مختلف MLR

Table 3. Results of different MLR models evaluation

مدل	میزان خطا	درصد خطا	ضریب تبیین
Model	RMSE	MAPE	R ²
خطی	23.01	5.74	0.38
2FI	21.09	5.12	0.52
درجه دوم کاهش یافته	6.61	1.63	0.95
درجه دوم	6.61	1.63	0.95

جدول ۴- ارزیابی تبدیلات مختلف

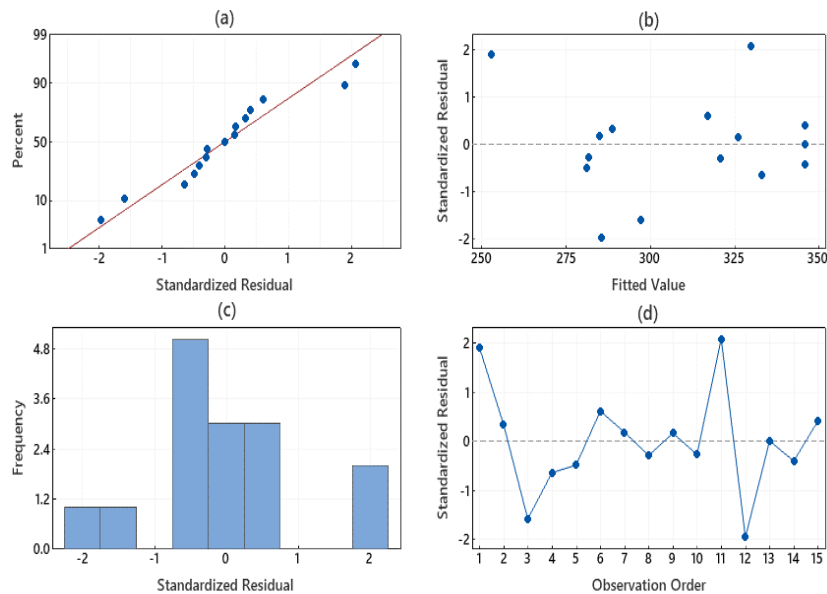
Table 4. Evaluation of various transformations

مدل	میزان خطا	درصد خطا	ضریب تبیین
Model	RMSE	MAPE	R ²
$y = f(x)$	6.61	1.63	0.95
$\ln y = f(x)$	8.39	2.28	0.92
$\sqrt{y} = f(x)$	8.56	2.34	0.92
$\ln y = f(\ln(x))$	11.21	2.67	0.86
$y = f(\sqrt{x})$	10.96	2.66	0.86
$\sqrt{y} = f(\sqrt{x})$	11.07	2.65	0.86
$\frac{1}{y} = f(x)$	8.33	2.37	0.92
$\frac{1}{\sqrt{y}} = f(x)$	8.25	2.92	0.92

داده شده است. مطابق شکل ۴(a and c) واضح است که پراکنش خطاها حول خط نرمال قرار دارد که موید نرمال بودن توزیع خطاها یا تبعیت خطای مدل از توزیع نرمال است. همچنین شکل ۴(b) نشان می‌دهد که توزیع مشخصی بین مقادیر برازش شده با خطاها وجود نداشته و در نتیجه واریانس تیمارها با یکدیگر اختلاف ناچیزی دارند. علاوه بر این، شکل ۴(d) نیز نشان می‌دهد که توزیع خطاها در مقابل ترکیب آزمایش از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند که این دلالت بر عدم وجود خودهمبستگی بین خطاهای مدل رگرسیونی داشته لذا نتایج تخمین‌های مدل قابل اعتماد خواهند بود.

۳-۲- تجزیه واریانس مدل رگرسیون و اعتبارسنجی

با توجه به کارایی بهتر مدل درجه دوم کاهش یافته، از آن برای تخمین میزان تولید متان استفاده شد که نتایج ارزیابی اعتبار این مدل در شکل ۴(a and c) برای متان قابل مشاهده است. برای ارزیابی اعتبار تجزیه واریانس نیاز به صادق بودن سه فرض نرمال بودن توزیع واریانس ها، یکسان بودن واریانس ها و عدم خودهمبستگی خطاها است. نتایج ارزیابی این سه فرض برای مدل سازی متان به ترتیب در شکل ۴ نشان



شکل ۴- نتایج ارزیابی اعتبار مدل رگرسیون چندگانه برای تولید متان
Fig 4. Results of multiple regression model evaluation for methane production

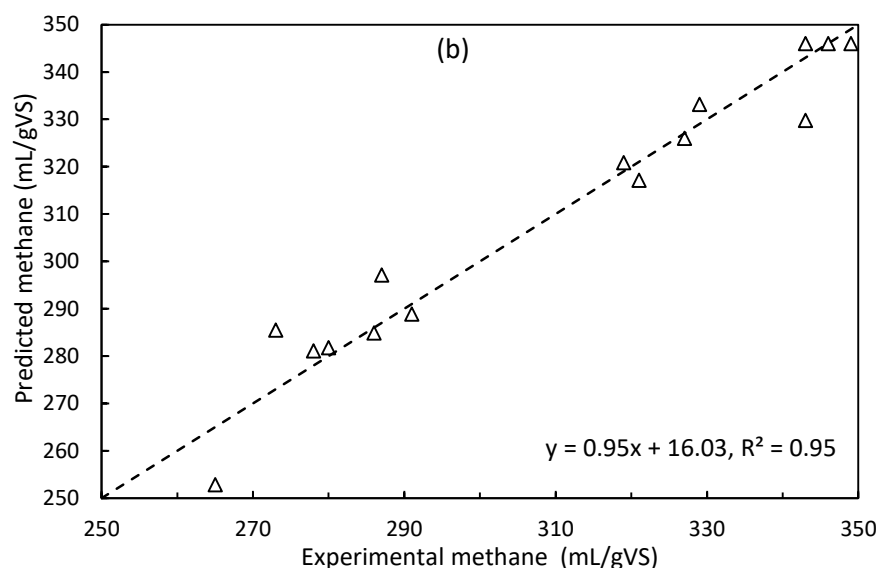
کفایت مدل درجه ۲ کاهش یافته برای تخمین میزان تولید متان است. همچنین مشاهده می‌گردد که مقادیر ضریب تبیین و ضریب تبیین تصحیح شده تقریباً برابر یکدیگر و بیشتر از ۰/۹ هستند. بنابراین می‌توان گفت که عامل‌های مدل درجه دوم برای پیش‌بینی میزان تولید متان کفایت می‌کنند. علاوه بر این، مدل رگرسیونی توانسته ۹۵ درصد تولید متان را توسط عامل‌های مدل تبیین نماید. در نتیجه می‌توان گفت مدل پیشنهادی قابل اعتماد خواهد بود.

جدول ۵ نتایج تحلیل واریانس مدل‌های درجه دوم کاهش یافته در تولید متان را نمایش می‌دهد. همان‌طور که نتایج مقادیر P-Value نشان می‌دهد و زمان به عنوان دو پارامتر تاثیرگذار دارای اثر معنی‌داری در سطح ۱ درصد در تغییرات تولید متان هستند. از سوی دیگر اثر غلظت در سطح ۱ درصد معنی‌دار نشد. همچنین مقدار P-Value عامل عدم برازش برای متان ۰/۰۸ می‌باشند که بزرگتر از ۰/۰۵ است. شایان ذکر است که عدم معنی‌داری عامل عدم برازش نشان‌گر

جدول ۵- نتیجه تجزیه واریانس مدل درجه دوم کاهش یافته MLR تولید متان

Table 5. Analysis of variance (ANOVA) for reduced quadratic model of methane production					
منابع تغییرات	درجه	مجموع مربع‌ها	میانگین مربع‌ها	F-Value	P-Value
Source of variations	آزادی	SS	MS		
	DF				
رگرسیون	6	11965.2	1994.21	24.38	0.00
دما °C	1	3499.8	3499.81	42.78	0.00
زمان (min)	1	3354.8	3354.79	41.01	0.00
غلظت (%)	1	985.00	985.00	12.04	0.01
T ²	1	3078.5	3078.52	37.63	0.00
t ²	1	2149.00	2148.98	26.27	0.00
C ²	1	960.10	960.06	11.73	0.01
باقیمانده	8	654.50	81.81		
عدم برازش	6	636.50	106.08	11.79	0.08
خطای خالص	2	18.00	9.00		
کل	14				

$$R^2 = 95\% \quad R_{adj}^2 = 90\%$$



شکل ۵- ارزیابی توافقی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده متان

Fig 5. Accordance assessment of methane values

قابل قبول خواهد بود. پایین بودن مقادیر انحراف معیار خطاها نشانگر خاصیت پایداری پیش‌بینی خوب مدل است. بنابراین مدل رگرسیونی قابل اعتماد بوده و مدل نهایی برای پیش‌بینی میزان بیوگاز و متان به صورت رابطه (۱) خواهد بود. ضرایب مدل رگرسیونی و انحراف معیار این ضرایب در جدول ۶ آورده شده است.

همانطور که در شکل ۵ نیز دیده می‌شود، مقدار ضریب همبستگی بین دو مجموعه داده واقعی و پیش‌بینی شده بیش از ۰/۹۵ است. حالت ایده‌آل شیب و عرض از مبدا خط رگرسیونی مابین دو مجموعه داده به ترتیب ۱ و ۰ است. بنابراین با توجه به نتایج عملکرد مدل MLR

جدول ۶- ضرایب مدل رگرسیونی تولید متان

Table 6. Coefficients of methane regression model

انحراف معیار	ضریب	
عرض از مبدا Intercept	-574	107
دما T	13.89	2.12
زمان t	2.28	0.36
غلظت C	24.66	7.11
T^2	-0.07	0.01
t^2	-0.01	0.00
C^2	-1.01	0.29

فرآیند هضم بی‌هوازی و تولید متان از تقسیم مجموع مربعات هر عامل بر مجموع مربعات کل محاسبه شد.

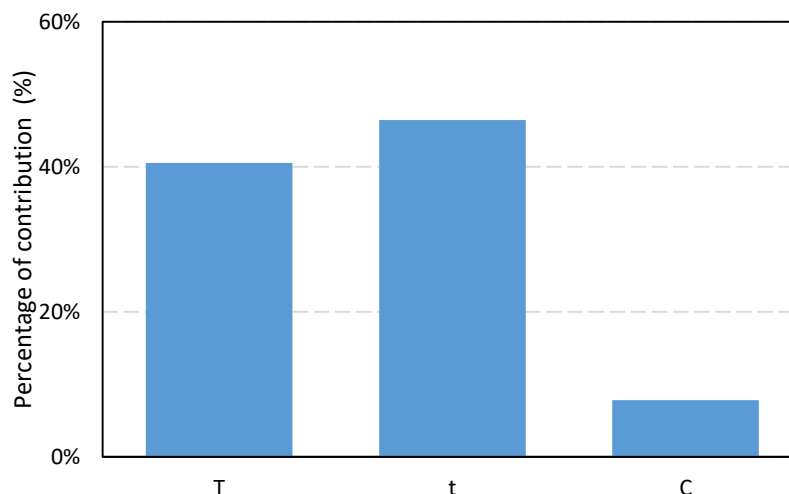
شکل ۶ اثر متغیرهای مذکور را در تولید متان نشان می‌دهد. آشکار است که مدت زمانی که مواد آلی در معرض پیش‌تیمار حرارتی قرار

۳-۳- سهم تاثیر هر یک از عوامل در تولید متان

سهم تاثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته یا تاثیر سه پارامتر دما، مدت زمان اعمال پیش‌فرآوری حرارتی و غلظت مواد هضم‌شونده در این مدل بررسی شده و اثر هریک از این عوامل بر

غلظت مواد هضم شونده (۷/۸۳ درصد) نیز کمترین تاثیر را در میزان تولید متان داشته است.

گرفتند بیشترین اثر (۴۶/۴۴ درصد) را در تولید متان گذاشته و دمای پیش تیمار (۴۰/۵۴ درصد) در درجه دوم اهمیت بوده است. همچنین



شکل ۶- سهم تاثیر دما (T)، زمان پیش تیمار (t) و غلظت (C) در تولید متان

Fig 6. Contributions of pretreatment temperature(T), time(t) and digestate concentration(C) to methane production

رسیدند (Barjenbruch *et al.* 2011). نتایج آنها نشان داد که لیاف گیاهی تحت این دما از هم گسیخته نمی شوند اما تحت تاثیر این پیش فراوری قرار می گیرند. در مطالعه دیگری گزارش شد که پیش فراوری حرارتی موجب حلالیت پروتئین ها و افزایش حذف ذرات کربوهیدراتی شد (Neyens & Beyens, 2003). از سوی دیگر دلیل کاهش تولید متان در دمای بالای ۱۰۰ درجه سلسیوس احتمالاً واکنش قهوه ای شدن و مایلارد بوده است که منطبق با نتیجه برخی محققین نیز هست. (Liu *et al.* 2012) پیش فراوری حرارتی پسماندهای غذایی و پسماندهای میوه و سبزیجات را در دمای ۱۷۵ °C مطالعه و به ترتیب کاهش ۷/۹ و ۱۱/۷ درصدی تولید متان را گزارش نمودند که این کاهش نیز به دلیل تشکیل ملانوئیدین ها^۱ گزارش شده است.

۳-۵- بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک

از مدل رگرسیونی که در بخش قبل بدست آمد به عنوان تابع هدف برای بهینه سازی استفاده شد. روش الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه سازی در حدود تغییرات سه متغیر دمای پیش فراوری، زمان اعمال پیش فراوری حرارتی و غلظت مواد هضم شونده استفاده شد.

بر اساس نتایج الگوریتم ژنتیک، دما و زمان بهینه پیش تیمار به ترتیب ۹۶ درجه سلسیوس و ۹۵ دقیقه و غلظت بهینه مواد هضم شونده به منظور تولید متان برابر با ۱۲ درصد حاصل گشت. شایان ذکر است میزان مورد انتظار تولید متان با اعمال این شرایط بهینه برابر ۳۵۴

۳-۴- نمودارهای سطح پاسخ

برای نمایش بهترین ترکیب متغیرهای مستقل می توان از نمودارهای سه بعدی استفاده نمود. شکل ۷ نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ تولید متان را در غلظت های مختلف تحت تاثیر دماها و زمان های مورد بررسی نشان می دهد. نمودارهای سطح پاسخ نشان می دهند که با افزایش زمان پیش تیمار در محدوده زمانی مورد بررسی، تولید متان ابتدا افزایش و سپس با شیب نسبتاً ملایمی کاهش می یابد. آشکار است که با افزایش دما از ۷۰ درجه سلسیوس به ۱۱۰ درجه سلسیوس ابتدا افزایش تولید متان و سپس کاهش تولید اتفاق افتاده است. این موضوع در هر سه غلظت ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد مشهود است. این نتیجه در تطابق نسبی با نتایج دیگر محققین در خصوص اثر اعمال پیش تیمار حرارتی بر پسماندهای آلی گوناگون است. برای مثال (Ma *et al.* 2011) افزایش ۲۴ درصدی تولید متان از پسماندهای غذایی پیش فراوری شده در دمای ۱۲۰ °C را گزارش کردند. (Rafique *et al.* 2010) پیش فراوری فضولات کود در دماهای بالاتر از ۱۱۰ °C را بررسی نموده و سخت و قهوه ای تیره شدن مواد تحت این دماها را نشانگر به وقوع پیوستن واکنش های مایلارد دانستند. (Perez-Elvira *et al.* 2009) گزارش کردند که اگر دمای پیش تیمار بیش از ۱۰۰ °C باشد، انرژی بیشتر صرف تبخیر آب می گردد و بنابراین از کارایی پیش فراوری می کاهد. طبق گزارش محققین، پیش فراوری حرارتی در دماهای کمتر از ۱۰۰ °C باعث تخریب لخته های مولکول های درشت شد. (Protot *et al.* 2011). محققان دیگری نیز با اعمال دمای ۹۰ °C به نتیجه مشابه ای

¹ Melanoidins

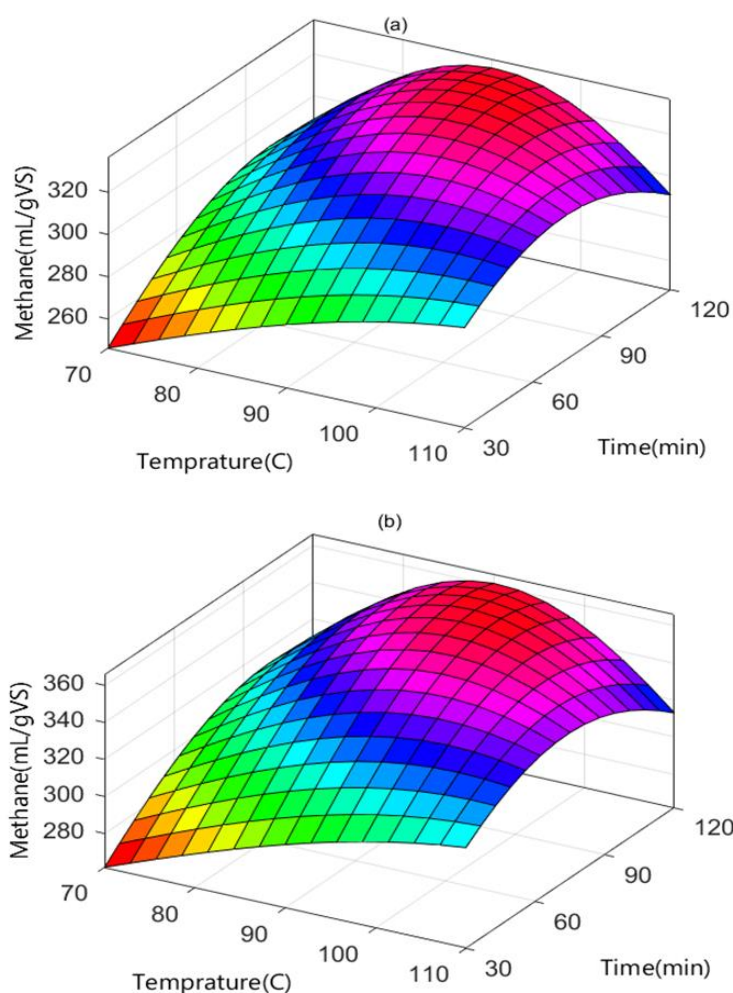
ترتیب ۹۶ درجه سلسیوس، ۹۵ دقیقه و ۱۲ درصد حاصل شده‌اند. این موضوع احتمالاً مربوط به انحلال بهتر مواد آلی و یا بهبود هیدرولیز بوده که دسترسی میکروارگانیسم‌ها را به پسماندهای آلی بهبود داده و بنابراین تولید متان افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که زمان پیش‌تیمار حرارتی (۴۶/۴۴ درصد) و پس از آن دمای پیش‌تیمار (۴۰/۵۴ درصد) بیشترین اثر را در تولید متان داشته در حالیکه غلظت مواد هضم شونده (۷/۸۳ درصد) سهم بسیار کمتری در میزان تولید متان داشته است.

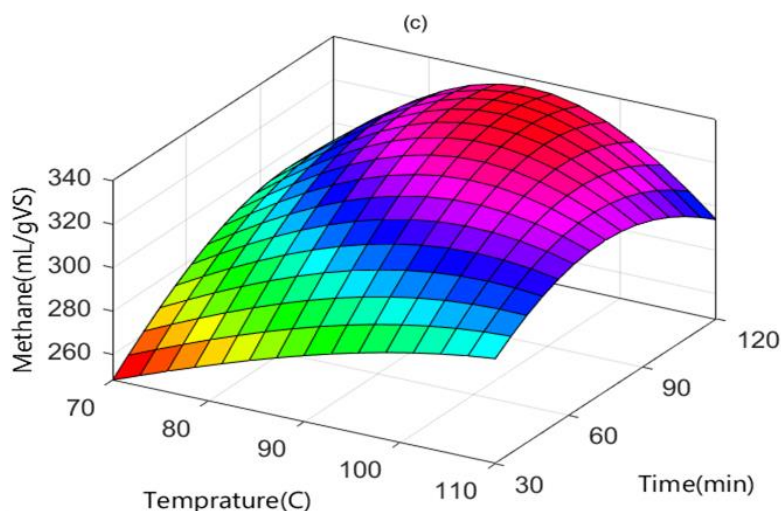
تحقیقات بیشتری در خصوص پیش‌تیمارهای حرارتی با استفاده از راکتورهای پیوسته و همچنین هضم در سایر غلظت‌های مواد و مقیاس واقعی به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر و مقایسه بهره خالص انرژی ناشی از اعمال پیش‌فرآوری حرارتی مورد نیاز خواهد بود.

میلی‌لیتر به ازای هر گرم ماده آلی فرار خواهد بود. از سوی دیگر میزان واقعی تولید متان ناشی از هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی پس از اعمال شرایط بهینه دما و زمان پیش‌تیمار در غلظت ۱۲ درصد 347 ± 4.58 میلی‌لیتر به ازای هر گرم ماده آلی فرار موجود در پسماند آلی بوده که نزدیک به میزان مورد انتظار متان تولیدی حاصل از روش الگوریتم ژنتیک بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که اعمال پیش‌فرآوری حرارتی پسماند آلی پیش از هضم بی‌هوازی در تولید متان کاملاً موثر بوده است. پس از مدل‌سازی متغیرهای مورد بررسی با طرح باکس‌بنکن و دستیابی به نتایج بهینه‌سازی الگوریتم، بهترین دما و زمان و غلظت برای تولید متان به





شکل ۷- نمودار سطح پاسخ تولید متان بر حسب تغییرات دما و زمان در غلظت: a: ۸ درصد، b: ۱۲ درصد و c: ۱۶ درصد

Fig 7. Response Surface diagram for methane production based on pretreatment temperature and time at the concentration of a: 8%, b: 12% and c: 16%

۵- منابع

- American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. Washington DC (USA): American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., and Van Lier, J. B. (2009). *Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays*. Water science and technology. 59(5): 927-934.
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Frunzo, L., Esposito, G., Lens, P. N., and Pirozzi, F. (2014). *Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods*. Journal of environmental management. 146: 142-149.
- Barjenbruch, M., & Kopplow, O. (2003). *Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge*. Advances in Environmental Research. 7(3): 715-720.
- Chynoweth, D.P., Owens, J.M., and Legrand, R. (2001). *Renewable methane from anaerobic digestion of biomass*. Renewable energy. 22(1-3): 1-8.
- Climont, M., Ferrer, I., del Mar Baeza, M., Artola, A., Vázquez, F., and Font, X. (2007). *Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions*. Chemical Engineering Journal. 133(1-3): 335-342.
- Gupta, P., Singh, R.S., Sachan, A., Vidyarthi, A.S., and Gupta, A. (2012). *A re-appraisal on intensification of biogas production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16(7): 4908-4916.
- Liu, X., Wang, W., Gao, X., Zhou, Y., and Shen, R. (2012). *Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste*. Waste Management. 32(2): 249-255.
- Ma, J., Duong, T. H., Smits, M., Verstraete, W., and Carballa, M. (2011). *Enhanced biomethanation of kitchen waste by different pre-treatments*. Bioresource technology. 102(2): 592-599.
- Maghanaki, M.M., Ghobadian, B., Najafi, G., and Galogah, R.J. (2013). *Potential of biogas production in Iran*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 28:702-714.
- McLeod, J. D., Othman, M. Z., Beale, D. J., and Joshi, D. (2015). *The use of laboratory scale reactors to predict sensitivity to changes in operating conditions for full-scale anaerobic digestion treating municipal sewage sludge*. Bioresource technology. 189: 384-390.
- Neyens, E., and Baeyens, J. (2003). *A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability*. Journal of hazardous materials. 98(1-3): 51-67.
- Pérez-Elvira, S., Fdz-Polanco, M., Plaza, F. I., Garralón, G., & Fdz-Polanco, F. (2009). *Ultrasound pre-treatment for anaerobic digestion improvement*. Water Science and Technology. 60(6): 1525-1532.
- Prorot, A., Julien, L., Christophe, D., and Patrick, L. (2011). *Sludge disintegration during heat treatment at low temperature: a better understanding of involved mechanisms with a multiparametric approach*. Biochemical engineering journal. 54(3): 178-184.

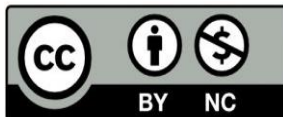
Rafique, R., Poulsen, T. G., Nizami, A. S., Murphy, J. D., and Kiely, G. (2010). *Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production*. Energy, 35(12): 4556-4561.

Raposo, F., De la Rubia, M. A., Fernández-Cegri V., and Borja, R. (2012). *Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16(1): 861-877.

Saxena, R. C., Adhikari, D. K., and Goyal, H. B. (2009). *Biomass-based energy fuel through biochemical*

routes: A review. Renewable and sustainable energy reviews. 13(1): 167-178.

Scherzinger, M., and Kaltschmitt, M. (2021). *Thermal pre-treatment options to enhance anaerobic digestibility – A review*. Renewable and sustainable energy reviews. 137: 110627.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)