ORIGINAL ARTICLE

Production of Methane from Food Waste Using Microwave Radiation: Investigating the Effects of Power, Exposure Time and Kinetics Process

Hossein Haji Agha Alizadeh[1], Rahman Seifi[2], Seyed Abbas Radmard[3]

[1] Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran
[2] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran
[3] PhD Student in Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

(Received February 1, 2016 ; Accepted April 17, 2016)

Abstract

Background and purpose: Energy recovery from waste is an appropriate method for waste management and energy production from food waste. Energy production through waste incineration produces significant emission which is a critical threat for environment. Anaerobic digestion of the waste is a suitable way to produce clean energy. This study aimed to investigate the anaerobic digestion from food waste using microwave pretreatments in different levels of power and time that eventually increase anaerobic digestion and produce methane.

Materials and methods: The food waste was collected from the restaurant in Bu-Ali Sina University and microwave (MW) treatment was performed before feeding reactor. Pretreatment process of the food waste was done by a domestic MW (P= 450 and 630 W) in different radiation times (100, 200 and 300 s). Reactors at mesophilic temperature (37°C) were launched for 15 days and SCOD and TCOD values were measured before loading and at the end of the tests. Using MATLAB software, the cumulative methane values were fitted on exponential, modified Gompertz and logistic models and the best model was determined in terms of the highest R^2 and lowest RMSE and SSE amounts.

Results: Based on the results, the best performance of anaerobic digestion, the maximum percentage of SCOD/TCOD% and the highest rate of methane production were obtained in 630 W microwave power and 300 s exposure time. Also, cumulative methane production was fitted using exponential, modified Gompertz and logistic models.

Conclusion: Increasing the power and exposure time enhanced solubility and the SCOD/TCOD% of the food waste. By increase in SCOD/TCOD% the daily biogas and methane productions also increase. The $TS_{removed}$ and $VS_{removed}$ values increase when the microwave power and exposure time increased. Also, the modified Gompertz model is a comprehensive and flexible model that is well fitted the experimental data and modified Gompertz model results in the highest R^2 value and the lowest RMSE and SSE.

Keywords: food waste, anaerobic digestion, microwave power, exposure time

J Mazandaran Univ Med Sci 2016; 26(138): 170-180 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره بیست و ششم شماره ۱۳۸ تیر سال ۱۳۹۵ (۱۸۰-۱۷۰)

بررسی تولید متان از پسماند مواد غذایی با استفاده از تابش مایکروویو : تاثیر توان و زمان تابش و ارائه سینیتک فرآیند

حسین حاجی آقا علیزاده[۱] رحمن سیفی[۲] سید عباس رادمرد[۳]

چکیده

سابقه و هدف: بازیافت انرژی از پسماندها، روشی مناسب برای مدیریت پسماندها و تولید انرژی از پسماندهای مواد غذایی است. تولید انرژی به روش سوزاندن پسماندها، گازهای آلاینده قابل توجهی تولید می کند که تهدیدی برای محیط زیست می باشد. هضم بی‌هوازی پسماندها، روشی مناسب برای تولید انرژی پاک می باشد. هدف این مطالعه بررسی هضم بی‌هوازی پسماند مواد غذایی به‌وسیله آماده سازی با مایکروویو در زمان و توان‌های مختلف است که در نهایت موجب افزایش هضم بی‌هوازی و تولید متان می‌شود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، پسماند مواد غذایی از رستوران دانشگاه بوعلی‌سینا جمع‌آوری شد و آماده‌سازی پسماندهای مواد غذایی توسط مایکروویو قبل از تغذیه راکتورها انجام گرفت. به منظور آماده سازی پسماند مواد غذایی، از مایکروویو خانگی با توان‌های ۴۵۰ و ۶۳۰ وات و در مدت زمان‌های تابش مایکروویو ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه استفاده شد. راکتورها در دمای مزوفیلیک (۳۷ درجه) و در ۱۵ روز راه‌اندازی شدند و مقادیر SCOD و TCOD قبل از بارگذاری و در انتهای آزمایش اندازه‌گیری شدند. مقادیر متان تجمعی آزمایشگاهی با کمک نرم‌افزار متلب بر معادلات نمایی، گومپرتز تغییرشکل یافته و لاجستیک برازش شدند و بهترین مدل از لحاظ بیش‌ترین مقدار R^2 و کم‌ترین مقدار RMSE و SSE مشخص شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج، بهترین عملکرد هضم بی‌هوازی، بیش‌ترین مقدار SCOD/TCOD% و بیش‌ترین تولید متان در توان مایکروویو ۶۳۰ وات و در مدت زمان تابش ۳۰۰ ثانیه به‌دست آمد. هم‌چنین همه منحنی‌های تولید متان تجمعی با مدل‌های ریاضی نمایی، گومپرتز تغییر شکل یافته و لاجستیک برازش شدند.

استنتاج: افزایش توان و زمان تابش مایکروویو موجب افزایش محلولیت مواد و SCOD/TCOD% مواد غذایی می گردد. متناسب با افزایش مقدار SCOD/TCOD% ، مقدار تولید بیوگاز روزانه نیز افزایش می‌یابد. مقدار کاهش TS و VS با افزایش توان و زمان تابش مایکروویو افزایش می‌یابد. هم‌چنین مدل گومپرتز تغییر شکل یافته، مدلی جامع و انعطاف‌پذیر می‌باشد که به‌خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برازش می‌شود و بیش‌ترین مقدار R^2 و کم‌ترین مقدار RMSE و SSE را نتیجه می‌دهد.

واژه های کلیدی: پسماند مواد غذایی، هضم بی هوازی، مدت زمان تابش مایکروویو، توان مایکروویو

مقدمه

پسماندهای مواد غذایی تهدیدی برای محیط زیست می‌باشد. هضم بی‌هوازی پسماندهای مواد غذایی به عنوان یک انتخاب مناسب مورد توجه می‌باشد. پسماندهای مواد غذایی شامل مقدار قابل توجهی از رطوبت، مواد آلی،

مولف مسئول: حسین حاجی آقا علیزاده- همدان: دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده کشاورزی، گروه بیوسیستم E-mail: h-alizade@basu.ac.ir

۱. استادیار، گروه بیوسیستم؛ دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

۳. دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

تاریخ دریافت : ۱۳۹۴/۱۱/۱۲ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : ۱۳۹۴/۱۱/۱۸ تاریخ تصویب : ۱۳۹۵/۱/۲۹

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

ذرات غیرقابل تجزیه و ارگانسیم‌های زنده است. در چند دهه گذشته مخلوط پسماندهای مواد غذاییو پسماندهای جامد شهری برای تولید گرما یا انرژی مورد استفاده قرار می‌گرفتند(۲،۱). فرآیند هضم بی‌هوازی پسماندهای مواد آلی یکی ازمهم‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل در عملیات بازیافت انرژی از پسماندهای مواد غذایی می‌باشد که در تولید بیوگاز و از بین بردن میکروب‌ها نقش مهمی دارد(۳). فرآیند هضم بی‌هوازی پسماندها شامل چهار مرحله هیدرولیز، اسیدوژن، استاژن و متانوژن می‌باشد. هیدرولیز به عنوان مرحله محدودکننده برای هضم بی‌هوازی می‌باشد. در هضم بی‌هوازی، میکروارگانیسم‌ها، مواد آلی (چربی‌ها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها) را در مرحله متانزایی به بیوگاز تبدیل می‌کنند. تحت فرآیند آماده‌سازی پسماندها، مسیر هیدرولیز مواد آلی براساس فرآیند بروکس (Brooks) بدین شرح است: هیدرولیز چربی‌ها و تبدیل آن به اسید استاریک و اسید اولیک، هیدرولیز پروتئین و تبدیل آن به مجموعه‌ای از اسیدهای اشباع و غیر اشباع و مقداری دی‌اکسید کربن و هیدرولیز کربوهیدرات‌ها و تبدیل آن‌ها به پلی‌ساکاریدهایی با وزن مولکولی کم و تا حد امکان تبدیل آن به قند ساده. فرآیند آماده سازی، مولکول‌های بزرگ وپیچیده را به مولکول‌های کوچک‌تر و با ساختار ساده‌تر تبدیل می‌کند تا به‌راحتی در دسترس میکروارگانیسم‌ها قرار گیرد(۵،۴). آماده‌سازی مواد به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که شامل روش‌های مکانیکی، آلتراسونیک، گرمایی، شیمیایی، آنزیمی، ترموشیمیایی و تعدادی روش دیگر که موجب افزایش هضم بی‌هوازی می‌گردد، است. آماده‌سازی پسماندها به روش‌های گرمایی به منظور تجزیه پسماندهای آلی با پیوندهای قوی استفاده می‌شود. در آماده‌سازی پسماندها به روش مایکروویو پتانسیل قابل توجهی وجود دارد که به عنوان منبع گرمایی در آماده کردن پسماندهای مواد غذایی به‌کار می‌رود که به منظور آماده‌کردن پسماندهای مواد غذایی در تولید محیط‌زیست پاک و تولیدات با ارزش مانند متان، دی‌اکسید و کود پیشنهاد شده است. تابش الکترومغناطیسی مایکروویو روشی مناسب برای بهبود حلالیت، افزایش تولید بیوگاز و از بین بردن میکروب‌ها است. مایکروویو، انرژی الکترومغناطیس با امواج کوتاه هستند که در فرکانس‌های ۳۰۰ مگا هرتز و تا ۳۰ گیگا هرتز قرار دارند که موجب افزایش انرژی جنبشی آب می‌گردد و باعث به جوش آمدن سریع آب می‌شود. انرژی کوانتوم به کار برده شده به‌وسیله تابش مایکروویو توانایی شکستن پیوندهای شیمیایی را ندارد در حالی که پیوندهای هیدروژن می‌توانند شکسته شوند(۶). تابش مایکروویو می‌تواند اثرات گرمایی و غیرگرمایی تولید کند. القاء گرمایی و ایجاد دو قطبی دی‌الکتریک باعث تغییرات در ساختمان پروتئین می‌شود و در نتیجه باعث هیدرولیز سلول‌های پسماند می‌گردد. قطبی‌سازی مولکول‌ها بوسیله چرخش مولکول‌ها ایجاد می‌شود که این چرخش ناشی از یک میدان الکتریکی متناوب است. مقدار فرکانس مایکروویو، مدت زمان تابش، غلظت بیوماس و عمق نفوذ، در فرآیند قطبی سازی مولکول‌ها موثر است. الاگرودی و گوهری(۷) اثر تغییرات پارامترهای موثر در پیش تیمار مایکروویو مانند درجه حرارت، شدت تابش مایکروویو و زمان تابش را مطالعه کردند.

Tiehm و همکاران و Muller و همکاران(۹،۸) نشان دادند که شدت توان و زمان تابش مایکروویو روی عملکرد مراحل آماده سازی پسماند موثر است. Marin و همکاران(۵) اثر تابش مایکروویو (تابش امواج الکترومغناطیسی همراه با اعمال فشار هوا) را روی حلالیت و هضم بی‌هوازی پسماندهای مواد غذایی مطالعه کردند. در حال حاضر مطالعه‌ای در مورد آماده‌سازی توسط مایکروویوهای خانگی روی پسماند مواد غذایی انجام نشده است. هدف این مطالعه بررسی هضم بی‌هوازی پسماند مواد غذایی به وسیله آماده‌سازی با مایکروویو در زمان و توان‌های مختلف است که در نهایت موجب افزایش هضم بی‌هوازی و تولید متان می‌شود.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

مواد و روش ها

مشخصات و شرایط آماده سازی پسماند مواد غذایی

پسماند مواد غذایی از رستوران مرکزی دانشگاه بوعلی سینای همدان جمع آوری شد که شامل ترکیباتی از مواد غذایی بود (جدول شماره ۱).

ابتدا ترکیبات برنج و ماکارانی پخته شده و پوست موز و سیب و گوشت گاو پخته تا حد امکان از پسماند آشپزخانه تفکیک شد و مقدار وزن هرکدام از ترکیبات مشخص شد. سپس این ترکیبات به‌صورت جداگانه توسط غذاساز دستی در ابعاد ۱تا۵ میلی‌متر خرد شدند و در نهایت کاملا با هم مخلوط گردیدند. آماده‌سازی توسط مایکروویو قبل از تغذیه راکتورها انجام شد. به منظور آماده‌سازی پسماند مواد غذایی از مایکروویو خانگی (Model: R-677, SharpElectronics, UK) استفاده شد. در هر مخزن شیشه‌ای، مقادیر ۳۵۰ گرم پسماند و ۳۵۰ گرم آب با هم مخلوط شده و توسط مایکروویو با توان‌های ۴۵۰ و ۶۳۰ وات و در مدت زمان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه در معرض تابش قرار گرفت. بعد ازآماده سازی، نمونه‌ها در دمای اتاق نگهداری شدند تا به دمای محیط آزمایشگاه برسند و به منظور جلوگیری از تبخیر مواد آماده شده، درب مخزن شیشه‌ای کاملا آببند شد(۱۰) و تمام آنالیزهای SCOD (مقدار اکسیژن لازم محلول برای واکنش شیمیایی) و TCOD (مقدار اکسیژن لازم کل برای واکنش شیمیایی) در دمای محیط آزمایشگاه (۲۳ °C) انجام شد.

هاضم‌ها (راکتورها) و شرایط آزمایش

۱- آماده سازی و آنالیز راکتورها جهت تولید متان

ترکیبات با غذا ساز دستی به ابعاد ۱ تا ۵ میلی‌متر خرد شدند و سپس تا حد امکان کاملاً با هم مخلوط شدند تا مخلوطی تقریبا همگن ایجاد شود. مقدار ۳۵۰ گرم از این مخلوط همگن را در داخل بطری‌های شیشه‌ای ریخته و به مقدار ۳۵۰ گرم آب به بطری اضافه شد. هفت عدد راکتور (مخزن شیشه‌ای) یک لیتری که دارای مخلوط ۳۵۰ گرم پسماند و ۳۵۰ گرم آب می‌باشد، تهیه شد (تصویر شماره ۱). یکی از راکتورها بدون آماده‌سازی توسط مایکروویو (شاهد) و شش راکتور دیگر را توسط مایکروویو در توان‌ها و زمان‌های مختلف آماده شدند. بعد از خارج کردن بطری‌ها از مایکروویو، در دمای آزمایشگاه قرار داده شد تا با دمای محیط یکسان شود و سپس ۵۰ سی‌سی از مایع داخل هر بطری برداشته شد و جهت آنالیز SCOD و TCOD به آزمایشگاه بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی همدان فرستاده شد. بعد از آماده سازی توسط مایکروویو، به منظور تسریع در فرآیند هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز و متان، مقدار ۲۰ سی‌سی از محتوای شکمبه گوسفند به داخل هر یک از راکتورها اضافه گردید. این راکتورها به عنوان هاضم‌های بی‌هوازی با جریان هیدرولیکی ناپیوسته هستند و در داخل حمام آب گرم با دمای $35\ ^{o}C$ نگهداری شدند. سپس در طول مدت زمان ماند، مقدار بیوگاز و متان تولید شده در همه هاضم‌ها اندازه‌گیری شدند.

جدول شماره ۱: ترکیبات پسماند مواد غذایی در هر مخزن شیشه ای

ترکیبات	مقدار پسماند مواد غذایی (بر حسب گرم)	
	حداقل	حداکثر
برنج پخته شده	۱۱۲	۱۳۳
ماکارونی پخته شده	۸۰/۵	۹۴/۵
پوست موز	۴۹	۵۶
سیب	۴۹	۵۶
گوشت گاو پخته شده	۲۸	۴۲



تصویر شماره ۱: هاضم بی هوازی با جریان هیدرولیکی ناپیوسته

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

در این تحقیق، به منظور بررسی عملکرد هاضم‌ها در شرایط دمایی مزوفیلیک، پارامترهای مختلفی مانند pH، TS (مقدار جامد کل)، VS (مقدار جامد فرار)، SCOD، TCOD، مقدار بیوگاز و متان تولیدی اندازه‌گیری شدند. روش اندازه‌گیری SCOD و TCOD بر اساس D ۵۲۲۰ از روش‌های استاندارد APHA می‌باشد(۱۱) که با همکاری گروه مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام شد و روش اندازه‌گیری TS بر اساس 2540 B (Total Solids Dried at 103–105°C) و روش اندازه‌گیری VS بر اساس 2540 E (Fixed and Volatile Solids Ignited at 550°C) در آزمایشگاه گروه علوم دامی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا انجام شد. مقدار تقریبی ۲۰ گرم ماده جامد قبل و بعد از آماده‌سازی توسط مایکروویو و وزن ظرف توسط ترازوی دیجیتال (AND GF-6000, Japan) با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند و سپس در دستگاه اوون به مدت ۲۴ ساعت نگه داشته شد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، به منظور هم دما شدن نمونه‌ها با محیط، نمونه‌ها در داخل دسیکاتور قرار داده شد و سپس وزن شدند. سپس نمونه‌ها را در داخل کوره حرارتی با دمای ۵۵۰ درجه به مدت ۲ ساعت قرار داده شد. مدت زمان‌ها با مقاله (۲۰۱۰). Marin که از روش APHA استفاده شده است، مطابقت دارد. بعد از سرد شدن کوره با محیط نمونه‌ها را داخل دسیکاتور قرار داده شد و سپس وزن شدند. مقادیر TS و VS از روابط زیر به‌دست آمد.

$$TS(\%)= (W_1-W_0)/(W_2-W_0) *100 \quad (۱)$$

$$VS(\%)= (W_2-W_3)/(W_2-W_0)*100 \quad (۲)$$

W_0 وزن ظرف بر حسب گرم

وزن ظرف و ماده قبل از قبل از خشک شدن در دمای ۱۰۵ درجه (W_1) بر حسب گرم

وزن نهایی ظرف و نمونه بعد از خشک شدن در دمای ۱۰۵ درجه (W_2) بر حسب گرم

وزن نهایی ظرف و نمونه بعد از خشک شدن در دمای ۵۵۰ درجه (W_3) بر حسب گرم

مقدار pH توسط دستگاه pH متر (pH-230SD, Lutron Electronic Enterprise Co., LTD, Taiwan) و میزان فشار بیوگاز تولید شده در هاضم‌ها و درصد متان موجود در آن توسط دستگاه اندازه‌گیری فشار و متان GMAS 1702 (شرکت رادپایا، ایران) اندازه‌گیری شدند.

۲- *مدل سازی فرآیند تولید متان*

مدل‌های فرآیند تولید متان و بیوگاز توسط معادلات نمایی، تغییر شکل یافته گومپرتز و لاجستیک جهت تخمین و پیش‌بینی میزان تولید متان و بیوگاز تجمعی بصورت تابعی از زمان ارائه گردید. روابط مربوط به این معادلات در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.

پارامترهای ومتغیرهای موجود در روابط در معادلات جدول شماره ۲ در جدول شماره ۳ توضیح داده شده است.

جدول شماره ۲: مدل های مورد استفاده در تخمین و مدل سازی تولید گاز (۱۳،۱۲)

مدل	رابطه ریاضی
نمایی	$\begin{cases} Y = S.G\{1-\exp[-M(t-\lambda)]\} & \forall t > \lambda \\ 0 & \forall t < \lambda \end{cases}$
گومپرتز تغییر شکل یافته	$Y = S.G.\exp\left\{-\frac{B_r}{C_r}\exp(-C_r t) - \frac{B_s}{C_s}\exp(-C_s t)\right\}$
لاجستیک	$Y = \frac{A}{1+\exp[\frac{4\mu_m}{A}(\lambda - t)+2]}$

جدول شماره ۳: مشخصات پارامترهای مدل های غیر خطی

متغیر	توضیحات	واحد
Y	مقدار متان یا بیوگاز تولید شده	mm^3
S	مقدار پسماند موجود در شروع تخمیر	kg
G	فاکتور ثابت عملکرد (حجم گاز تولید شده نسبت به مقدار پسماند)	mm^3/kg
M,B,C	متغیر ثابت (تابع میزان تولید ویژه گاز)	d^{-1}
t	زمان تخمیر در راکتور	d
λ	زمان تاخیر بین شروع تخمیر اولین زمان تولید گاز	d
B_r, C_r	متغیرهای ثابت (تابع میزان تولید ویژه گاز) مربوط به تولید سریع گاز در مدت زمان آغاز مراحل تخمیر	d^{-1}
B_s, C_s	متغیرهای ثابت (تابع میزان تولید ویژه گاز) مربوط به تولید آهسته گاز در مدت زمان آغاز مراحل تخمیر	d^{-1}
μ_m	بیشترین مقدار تولید ویژه گاز	d^{-1}
A	متغیر ثابت	--------

مدل‌های غیر خطی با استفاده از رگرسیون غیر خطی برازش شدند. برازش رگرسیون غیر خطی توسط الگوریتم مارکوارت (Marquardt) انجام شد(۱۳). از این

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

روش برای به حداقل رساندن میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده استفاده می‌شود. به منظور تعیین مقدار μ_m، الگوریتم مارکوارت به‌طور خودکار مقادیر ابتدایی را به روش جستجوی بیش‌ترین شیب منحنی بین چهار نقطه محاسبه می‌کند و مقدار λ به روش تقاطع خط مماس بر μ_m با محور X تخمین زده می‌شود. به‌طور کلی الگوریتم، مجموعه پارامترهای معادلات را برای حداقل کردن مقادیر RMSE و SSE محاسبه می‌کند. برای تحلیل آماری معادلات از نرم‌افزار MATLAB 8.1® استفاده شده است. همچنین عملکرد تولید بیوگاز و متان از نسبت میزان تولید بیوگاز و متان به مقدار VSپسماند ورودی به راکتور محاسبه می‌شود که از رابطه ۳ و ۴ به دست می آیند(۱۴):

$$Y_{biogas,rate} = \frac{Y_{biogas}}{VS_{in}} \quad (۳)$$

$$Y_{CH_4,rate} = \frac{Y_{CH_4}}{VS_{in}} \quad (۴)$$

در روابط ۳ و ۴، VS_{in} مقدار جامد فرارپسماند مواد غذایی در هنگام تغذیه راکتور می باشد و Y_{biogas}، Y_{CH_4} بیوگاز و متان تولید شده به‌طور روزانه بر حسب میلی‌لیتر می‌باشد. $Y_{biogas,rate}$، $Y_{CH_4,rate}$ عملکرد تولید بیوگاز و متان هستند که بر حسب $ml_{bigas}\, t_{VS_{in}}^{-1}$ و $ml_{methane}\, t_{VS_{in}}^{-1}$ می‌باشند. مقدار کاهش TS و VS از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند(۱۴):

$$TS_{removed}\% = \frac{TS_{initioal} - TS_{final}}{TS_{initioal}} \times 100 \quad (۵)$$

$$VS_{removed}\% = \frac{VS_{initioal} - VS_{final}}{VS_{initioal}} \times 100 \quad (۶)$$

مقادیر $TS_{initiol}$ و TS_{final} نشان دهنده مقادیر ماده جامد کل پسماند مواد غذایی قبل از ورود به راکتور و بعد از خارج شدن از راکتور می‌باشد و مقادیر $VS_{initiol}$ و VS_{final} نشان‌دهنده مقادیر جامد فرار پسماند مواد غذایی قبل از ورود به راکتور و بعد از خارج شدن از راکتور می‌باشد.

یافته ها

۱-تاثیر آماده سازی بر خصوصیات پسماند مواد غذایی

خصوصیات پسماند مواد غذایی قبل و بعد از آماده سازی توسط مایکروویو در زمان و توان‌های مختلف در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول شماره ۴، مقادیر TS و VS در تمام آزمایش‌های آماده‌سازی شده توسط مایکروویو نسبت به آزمایش بدون آماده‌سازی (شاهد)، به مقدار بیش‌تری کاهش یافته است. به عبارت دیگر مقادیر TS و VS متناسب با افزایش توان مایکروویو و زمان تابش کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار کاهش TS و VS در آماده سازی با توان ۴۵۰ وات به ترتیب در زمان‌های ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ ثانیه به‌دست آمد و بیش‌ترین مقدار کاهش TS و VS در آماده‌سازی با توان ۶۳۰ وات نیز به

جدول شماره ۴: خصوصیات پسماند مواد غذایی قبل و بعد از آماده سازی توسط مایکروویو

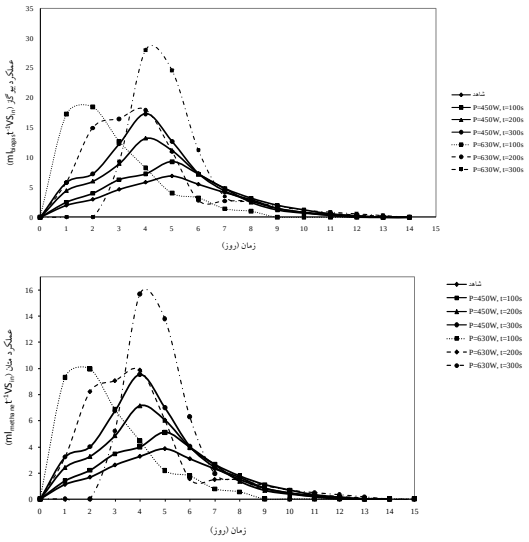
متغیر	بدون آماده سازی(شاهد)	مایکروویو با توان ۴۵۰ وات در زمان های			مایکروویو با توان ۶۳۰ وات در زمان های		
		۱۰۰s	۲۰۰s	۳۰۰s	۱۰۰s	۲۰۰s	۳۰۰s
مقدار TS پسماند قبل بارگذاری در راکتور (درصد)	۲۱/۹	۲۱/۹۷	۲۲/۰۵	۲۱/۷۳	۲۱/۸۵	۲۲/۰۲	۲۱/۸۴
مقدار TS پسماند در خروجی راکتور (درصد)	۱۶/۹۷	۱۶/۹۸	۱۷/۰۲	۱۶/۵۳	۱۶/۸۱	۱۶/۹۳	۱۶/۷۵
مقدار VS پسماند قبل بارگذاری در راکتور (درصد)	۲۱/۰۴	۲۰/۹۳	۲۱/۰۳	۲۰/۸۶	۲۰/۸۱	۲۰/۹۵	۲۰/۸۲
مقدار VS پسماند در خروجی راکتور (درصد)	۱۴/۰۷	۱۳/۹۶	۱۴	۱۳/۸۶	۱۳/۸۱	۱۳/۸۸	۱۳/۷۷
مقدارSCOD پسماند قبل بارگذاری راکتور (g/l)	۲۶/۶۱	۲۷/۸۶	۲۸/۶۵	۳۰/۸۳	۲۹/۹۱	۳۱/۷۷	۳۲/۲۶
مقدار SCOD پسماند در خروجی راکتور (g/l)	۳۵/۶	۴۸/۷۳	۵۳/۲۸	۵۶/۴۸	۵۴/۶۹	۵۷/۷۴	۵۸/۹۱
مقدارTCOD پسماند قبل بارگذاری راکتور (g/l)	۴۶/۸۷	۴۵/۱۱	۴۱/۶۱	۴۱/۷	۴۲/۸۷	۴۲/۴۳	۴۱/۷۲
مقدار TCOD پسماند در خروجی راکتور(g/l)	۵۸	۶۵/۲۹	۶۵/۴۸	۶۵/۳۴	۶۵/۶۸	۶۴/۷۲	۶۵/۳۶
درصد حلالیت پسماند قبل بارگذاری در راکتور (SCOD/TCOD%)	۵۶/۷۷	۶۱/۷۶	۶۸/۸۵	۷۳/۹۳	۶۹/۷۶	۷۴/۸۷	۷۷/۳۲
درصد حلالیت پسماند در خروجی راکتور (SCOD/TCOD%)	۶۱/۳۷	۷۴/۶۳	۸۱/۳۶	۸۶/۴۳	۸۳/۲۶	۸۹/۲۱	۹۰/۱۳
مقدار کاهش TS در خروجی راکتور (درصد)	۲۲/۵۱	۲۲/۶۸	۲۲/۷۹	۲۲/۹۳	۲۳/۰۵	۲۳/۱۱	۲۳/۲۸
مقدار کاهش VS در خروجی راکتور (درصد)	۳۳/۱۲	۳۳/۲۶	۳۳/۳۹	۳۳/۵۱	۳۳/۶۲	۳۳/۷۱	۳۳/۸۶

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

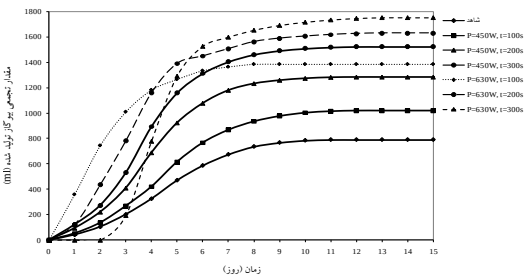
ترتیب در زمان‌های ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ ثانیه به‌دست آمد. به‌طور کلی مقدار کاهش TS و VS در آماده‌سازی با توان ۶۳۰ وات نسبت به آماده‌سازی با توان ۴۵۰ وات بیش‌تر است. مقدار درصد حلالیت پسماند مواد غذایی (SCOD/TCOD%) در شرایط آماده‌سازی توسط مایکروویو نسبت به آزمایش شاهد بیش‌تر است. به‌طور کلی مقدار (SCOD/TCOD%) در آماده‌سازی با توان ۶۳۰ وات بیش‌تر از آماده‌سازی با توان ۴۵۰ وات می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش توان مایکروویو و زمان تابش مقدار (SCOD/TCOD%) درپسماند موادغذایی نیز افزایش می‌یابد.

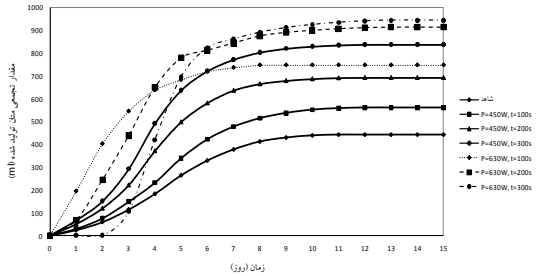
۲-تاثیر آماده سازی بر عملکرد تولید متان

عملکرد بیوگاز و متان تولیدی روزانه و مجموع بیوگاز و متان تولید شده در مدت زمان ۱۵ روز در نمودار شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است.



نمودار شماره ۱: تغییرات عملکرد روزانه الف) بیوگاز ب) متان تولیدشده در توان ها و زمان های تابش مختلف





نمودار شماره ۲: مقدار تجمعی الف) بیوگاز ب) متان تولید شده در توان ها و زمان های تابش مختلف

براساس نمودارشماره۱، مقدار عملکرد بیوگاز و متان در ابتدای آزمایش افزایش و سپس باگذشت زمان کاهش می‌یابد. در آزمایش شاهد، مقدار تولید بیوگاز و متان روزانه به ترتیب به $\mathbf{ml_{bigas}\, t_{VS_{in}}^{-1}}$ ۶/۸۹ و $\mathbf{ml_{methane}\, t_{VS_{in}}^{-1}}$ ۳/۸۵ افزایش می‌یابد و سپس تا پایان آزمایش روند نزولی دارد. مقدار عملکرد تولید بیوگاز روزانه در آماده‌سازی پسماند با توان ۴۵۰ وات و مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه به ترتیب تا ۹/۱۳، ۱۳/۲۱ و $\mathbf{ml_{bigas}\, t_{VS_{in}}^{-1}}$ ۱۷/۳۵ افزایش می‌یابد و سپس با گذشت زمان کاهش می‌یابد. همچنین مقدار عملکرد تولید متان روزانه در آماده‌سازی پسماند با توان ۴۵۰ وات و مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه به ترتیب به ۵/۱۲، ۷/۱۳ و $\mathbf{ml_{methane}\, t_{VS_{in}}^{-1}}$ ۹/۵۴ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در آماده‌سازی با توان ۶۳۰ وات و در مدت زمان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه، مقدار عملکرد بیوگاز تولیدی روزانه به ترتیب تا ۱۸/۵، ۱۷/۹۹ و $\mathbf{ml_{bigas}\, t_{VS_{in}}^{-1}}$ ۲۸/۰۴ افزایش و سپس‌کاهش می‌یابد. همچنین مقدار عملکرد تولید متان روزانه در آماده‌سازی پسماند با توان ۶۳۰ وات در مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه به ترتیب به ۹/۹۹، ۹/۸۹ و $\mathbf{ml_{methane}\, t_{VS_{in}}^{-1}}$ ۱۵/۷ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش تولید بیوگاز و متان روزانه موجب افزایش عملکرد تولید بیوگاز و متان می‌گردد. بر اساس نمودار شماره ۲، بیش‌ترین مقدار بیوگاز و متان تجمعی تولید شده در آماده‌سازی با توان ۶۳۰ وات و در مدت زمان تابش ۳۰۰ ثانیه، مقادیر ۱۷۵۱

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

و ۹۴۵/۵۴ میلی‌لیتر به‌دست آمد. در آماده‌سازی با توان ۶۳۰ وات و در مدت زمان‌های تابش ۱۰۰ و ۲۰۰، مقادیر بیوگاز و متان تجمعی به ترتیب ۱۳۸۵ و ۷۴۸ میلی‌لیتر و ۱۶۳۱ و ۹۱۳ میلی‌لیتر به‌دست آمد. در آماده‌سازی با توان ۴۵۰ وات و در مدت زمان تابش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه، مقادیر بیوگاز و متان تجمعی به ترتیب ۱۰۲۰ و ۵۶۱ میلی‌لیتر، ۱۲۸۳ و ۶۹۳ میلی‌لیتر و ۱۵۳۲ و ۸۳۸ به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، هرچه توان مایکروویو و مدت زمان تابش اشعه مایکروویو بیش‌تر باشد، مقدار بیوگاز و متان تولید شده نیز بیش‌تر خواهد شد.

۳-مدل سازی ریاضی فرآیند تولید گاز

در این تحقیق از ضرایب همبستگی (R^2)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) برای مقایسه برازش کردن بین مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. مدل‌های با نرم‌افزار ATLAB 8.1® برازش شدند و مقادیر ضرایب R^2، RMSE و SSE در جدول‌های شماره ۵ و ۶ گزارش داده شدند.

مدل‌های لاجستیک و تغییر شکل یافته گومپرتز، برازش مدل‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی با کم‌ترین مقادیر RMSE و SSE و بیش‌ترین مقادیر R^2 به‌خوبی انجام دادند. در این تحقیق، در آماده‌سازی پسماند با میکروویو با توان ۶۳۰ وات و مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه مدل تغییرشکل یافته گومپرتز با کم‌ترین مقدار RMSE و SSE و بیش‌ترین مقادیر R^2 برازش می‌کند.

بحث

۱-تاثیر آماده سازی بر خصوصیات پسماند مواد غذایی

افزایش توان و زمان تابش موجب افزایش دما و کاهش مقدار VS و TS می‌شود. مقدار کاهش به این

جدول شماره ۵: ضرایب R^2، RMSE و SSE در مدل های نمایی، تغییر شکل یافته گومپرتز و لاجستیک در تولید بیوگاز و در توان ها و زمان های مختلف مایکروویو

مدل ریاضی	متغیر	شاهد	مایکروویو با توان ۴۵۰ وات در زمان های			مایکروویو با توان ۶۳۰ وات در زمان های		
			۱۰۰s	۲۰۰s	۳۰۰ s	۱۰۰s	۲۰۰s	۳۰۰s
نمایی	R^2	۰/۹۵۸	۰/۹۶۰۸	۰/۹۵۸۷	۰/۹۶	۰/۹۹۲۴	۰/۹۶۸۵	۰/۹۰۶۱
	RMSE	۰/۰۸۷۸	۰/۰۸۴۲	۰/۰۸۴۴	۰/۰۸۲۱	۰/۰۲۹۷	۰/۰۶۹۵	۰/۱۴۲۷
	SSE	۰/۰۹۲۵	۰/۰۸۵۱	۰/۰۸۵۶	۰/۰۸۰۹	۰/۰۱۰۵	۰/۰۵۸	۰/۲۴۴۴
گومپرتز تغییر شکل یافته	R^2	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۸۹
	RMSE	۰/۰۲۰۹	۰/۰۱۷۳	۰/۰۱۸۲	۰/۰۱۶۸	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶۸
	SSE	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۸
لاجستیک	R^2	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸۵	۰/۹۸۸۵	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۶
	RMSE	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۵۳	۰/۰۳۵	۰/۰۲۵۵	۰/۰۲۸۲
	SSE	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۰۳

جدول شماره ۶: ضرایب R^2 ، RMSE و SSE در مدل های نمایی، گومپرتز تغییر شکل یافته و لاجستیک در تولید متان و در توان ها و زمان های مختلف مایکروویو

مدل ریاضی	متغیر	شاهد	مایکروویو با توان ۴۵۰ وات در زمان های			مایکروویو با توان ۶۳۰ وات در زمان های		
			۱۰۰s	۲۰۰s	۳۰۰s	۱۰۰s	۲۰۰s	۳۰۰ s
نمایی	R^2	۰/۹۵۸	۰/۹۶۰۸	۰/۹۵۸۷	۰/۹۶	۰/۹۹۲۴	۰/۹۶۸۵	۰/۹۰۶۱
	RMSE	۰/۰۸۷۸	۰/۰۸۴۲	۰/۰۸۴۴	۰/۰۸۲۱	۰/۰۲۹۶	۰/۰۶۹۵	۰/۱۴۲۷
	SSE	۰/۰۹۲۵	۰/۰۸۵۱	۰/۰۸۵۶	۰/۰۸۰۹	۰/۰۱۰۵	۰/۰۵۸	۰/۲۴۴۴
گومپرتز تغییر شکل یافته	R^2	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۸۹
	RMSE	۰/۰۲۱۲	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۸۲	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۶۸
	SSE	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۸
لاجستیک	R^2	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸۵	۰/۹۸۸۵	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۶
	RMSE	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۵۳	۰/۰۳۵	۰/۰۲۵۵	۰/۰۲۸۲
	SSE	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۰۳

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

علت است که ترکیبات مواد آلی موجود در پسماند واد غذایی در شیرآبه محلول می‌شود وتوسط میکروارگانیسم‌ها در دماهـای بـالاتر بهتـر تجزیـه مـی‌شـوند(۱۵). پـارامتر %SCOD/TCOD نشان می‌دهـد کـه چنـد درصـد از پسـماند مواد جامد به مواد آلی محلول در راکتور تبدیل شده اسـت. هر چه مقدار این پارامتر بیش‌تر باشد، نشان دهنده این اسـت که مواد آلی محلول بیش‌تری در دسترس میکروارگانیسـم‌هـا قـرار مـی‌گیـرد و در نتیجـه باعـث افـزایش تولیـد بیوگـاز می‌شود. مقـدار %SCOD/TCOD متناسـب بـا افـزایش تـوان مایکروویو و زمان تابش آن افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقدار تغییرات نسبت %SCOD/TCOD به نـوع مـواد پسـماند مـواد غذایی استفاده شده و دمای آماده‌سازی توسـط مـایکروویو بستگی دارد(۱۶). آماده‌سازی‌های حرارتی مانند آماده‌سـازی توسـط مـایکروویو موجـب تخریـب سـلولی مـواد غـذایی می‌گردد و موجب آزادسازی آنزیم‌هـا و ترکیبـات آلـی از پروتوپلاسم می‌شود که در نتیجه باعـث افـزایش محلولیـت پسماندها در شیرآبه وافزایش نسبت %SCOD/TCOD پسماند مواد غذایی می‌شود(۱۹-۱۷). افزایش دما موجب افـزایش فشار داخلی سلولی می‌گردد و در نهایت موجب تخریـب ساختار سلولی می‌شود و ساختارهای پیچیده و بلند را بـه ساختارهای کوچک‌تر تبدیل می‌کند(۱۹،۱۸). به عبـارت دیگر آماده سازی توسـط مـایکروویو موجـب تضـعیف نیروهای واندروالسی بین مولکول‌ها و پیوندهای هیـدروژنی می‌شود و باعث افزایش ترکیبات محلول می‌گردد(۵). لـذا با افزایش توان و زمان تابش، دمای فرآیند آمـاده‌سـازی توسـط مـایکروویو افـزایش مـی‌یابـد و باعـث تخریـب دیواره سلولی پسماند مواد غذایی مـی‌شـود و در نهایـت موجب افزایش محلولیت مواد %SCOD/TCOD می‌گردد.

۲-تاثیر آماده سازی بر عملکرد تولید متان

افـزایش زمـان تـابش و تـوان مـایکروویو موجـب تخریب ساختار سلولی پسماند مـواد غـذایی مـی‌شـود و ساختارهای پیچیده و بلند را به سـاختارهای کوچـک‌تـر تبدیل می‌کند و هم‌چنین موجب آزاد سازی آنـزیم‌هـا و ترکیبات آلی از پروتوپلاسم می‌شود و در نتیجه دسترسـی میکروارگانیسم‌ها به مـواد غـذایی راحـت‌تـر مـی‌شـود و تولید متان و بیوگاز روزانه نیز افـزایش مـی‌یابـد(۱۹). در ابتدای آزمایش، ترکیبات جامـد بـه راحتـی و بـه مقـدار کافی در دسترس میکروارگانیسم‌هـای بـی‌هـوازی قـرار دارد و در نتیجه باعث افزایش تولیـد متـان و بیوگـاز در مراحل اولیه آزمایش می‌گردد. با گذشت زمان ترکیبات محلول آلی موجود در شیرآبه کـم مـی‌شـود و در نتیجـه مواد آلی قابل دسترس میکروارگانیسم‌ها کاهش می‌یابد که باعث کاهش تولید بیوگاز و متان می‌گردد. بر اساس نمودار شـماره ۱ و ۲، بـه دلیـل کـاهش تولیـد بیوگـاز و متـان، قسـمت انتهـایی منحنـی تجمعـی بیوگـاز و متـان به‌صورت افقی می‌باشد که نشانه اتمام آزمایش می‌باشد. بر اساس نتایج جدول شـماره ۵ و ۶، مـدل لاجسـتیک و نمایی در نمودارهایی که زمان تاخیر در تولید بیوگـاز و متان ندارد، بخوبی برازش می کند ولـی در نمودارهـایی که زمان تاخیر دارد، ابتدا و انتهای نمودار را ماننـد مـدل گومپرتز تغییر شکل یافته، به‌خوبی برازش نمی‌کند. مدل نمایی در برازش داده‌های آزمایشگاهی بیش‌ترین مقـدار RMSE و SSE و کم‌ترین مقدار R^2 را دارا مـی‌باشـد. زیـرا مدل‌نمایی براین اساس فرض شده است که سرعت تخمیر و تجزیه مواد بعد از زمان تاخیر به سـرعت افـزایش مـی یابد که این امر موجب افزایش مقـدار RMSE و SSE و کاهش مقدارR^2 می شود(۲۱). به‌طور کلی مدل گومپرتز تغییر شکل یافته، مدلی جـامع و انعطـاف‌پـذیر بـرای هـر نموداری می‌باشد و نواقص مدل‌های لاجستیک و نمایی را در شرایط مختلف آزمایشگاهی ندارد. مدل گـومپرتز تغییر شکل یافته داده‌های آزمایشگاهی را در زمان تاخیر و داده‌های انتهایی را به‌خوبی برازش می کند.

سپاسگزاری

این تحقیق حاصل پایان نامه مقطع دکتری با شـماره ثبت ۱۱۶۹۶۸۳ است. بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

ریاست محترم دانشکده مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علـوم پزشـکی همـدان جهـت آنـالیز مقـادیر SCOD و TCODو ریاسـت محتـرم شـرکت گـاز همـدان جهـت آنالیز بیوگاز تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

1. Katami T, Yasuhara A, Shibamoto T. Formation of dioxins from incineration of foods found in domestic garbage. Environ Sci Technol 2004; 38(4): 1062-1065.
2. Amouei A, Asgharnia HA, Khodadi A. Study of compost quality from rural solid wastes (Babol, Iran). J Mazandaran Univ Med Sci 2009; 20(74): 55-61 (Persian).
3. Yousefi Z, Yazdani Cherati J, Movahedi M, Kariminejad F. Effect of Organic Loading Rate on the Performance of Anaerobic Process in Treatment of Pulp and Paper Mill Effluents. J Mazandaran Univ Med Sci 2015; 25(131): 136-150 (Persian).
4. Tampio E, Ervasti S, Rintala J. Characteristics and agronomic usability of digestates from laboratory digesters treating food waste and autoclaved food waste. Journal of Cleaner Production 2015; 94: 86-92.
5. Marin J, Kennedy KJ, Eskicioglu C. Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste. Waste Manag 2010; 30(10): 1772-1779.
6. Laghari SM, Isa MH, Abdullah AB, Laghari AJ, Saleem H. Microwave Individual and Combined Pre-Treatments on Lignocellulosic Biomasses. International Organization of Scientific Research (IOSR) Journal of Engineering 2014; 4(2): 14-28.
7. Elagroudy S, El-Gohary F. Properties of Waste Activated Sludge after Microwave Pretreatment. Int J Thermal & Environmental Engineering 2013; 5(2): 105-111.
8. Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, Neis U. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization. Water Res 2001; 35(8): 2003-2009.
9. Muller CD, Abu-Orf M, Novak JT. The effect of mechanical shear on mesophilic anaerobic digestion. In WEFTEC 76: Proceedings of the Water Environment Federation. Los Angeles, USA, 2003.
10. Shahriari H, Warith M, Hamoda M, Kennedy KJ. Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste combining two pretreatment modalities, high temperature microwave and hydrogen peroxide. Waste Manag 2012; 32(1): 41-52.
11. American Public Association (APHA). Standard methods for the test of water and wastewater, 19th ed. USA, Washington DC: American Public Health Association; 1995.
12. Grieder C, Mittweg G, Dhillon SB, Montes JM, Orsini E, Melchinger AE. Kinetics of methane fermentation yield in biogas reactors: Genetic variation and association with chemical composition in maize. Biomass and bioenergy 2012; 37: 132-141.
13. Zwietering MH, Jongenburger I, Rombouts FM, Van´triet K. Modeling of the Bacterial Growth Curve. Appl Environ Microbiol 1990; 56(6): 1875-1881.
14. Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Richtlinie: VDI 4631 Gütekriterien für Biogasanlagen. (Quality criteria for biogas plants). Berlin: *Beuth Verlag GmbH* 27.190 (4631).2011.
15. Dogan E, Dunaev T, Erguder TH and Demirer GN. Performance of leaching bed reactor converting the organic fraction of municipal solid waste to organic acids and

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

alcohols. Chemosphere 2008; 74(6): 797-803.

16. Tampio E, Ervasti S, Paavola T, Heaven S, Banks C, Rintala J. Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste. Waste Manag 2014; 34(2): 370-377.
17. Wang ZJ, Wang W, Zhang XH, Zhang GM. Digestion of thermally hydrolyzed sewage sludge by anaerobic sequencing batch reactor. J Hazard Mater 2009; 162(2-3): 799-803.
18. Hong SM, Park JK, Teeradej N, Lee YO, Cho YK, Park CH. Pretreatment of sludge with microwaves for pathogen destruction and improved anaerobic digestion performance. Water Environ Res 2004; 78(1): 76-83.
19. Cheng XY, Liu CZ. Enhanced biogas production from herbal-extraction process residues by microwave-assisted alkaline pretreatment. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 2010; 85(1): 127-131.
20. Kuglarz M, Karakashev D, Angelidaki I. Microwave and thermal pretreatment as methods for increasing the biogas potential of secondary sludge from municipal wastewater treatment plants. Bioresour Technol 2013; 134: 290-297.
21. Beuvink JM, Kogut J. Modeling gas production kinetics of grass silages incubated with buffered ruminalfluid. J Anim Sci 1993; 71(4):1041-1046.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]