

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

Hossein Haji Agha Alizadeh¹, Rahman Seifi², Seyed Abbas Radmard³

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 R² 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 R² 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).

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 بی هوازی پسماندها، روشی مناسب برای تولید انرژی پاک می باشد. هدف این مطالعه بررسی هضم بی هوازی پسماند مواد غذایی به وسیله آماده سازی با مایکروویو در زمان و توان های مختلف است که در نهایت موجب افزایش هضم بی هوازی و تولید متان می شود.

مواد و روش ها: در این مطالعه، پسماند مواد غذایی از رستوران دانشگاه بوعلی سینا جمع آوری شد و آماده سازی پسماندهای مواد غذایی توسط مایکروویو قبل از تغذیه راکتورها انجام گرفت. به منظور آماده سازی پسماند مواد غذایی، از مایکروویو خانگی با توان های ۴۵۰ و ۶۳۰ وات و در مدت زمان های تابش مایکروویو ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه استفاده شد. راکتورها در دمای مزوفیلیک (۳۷ درجه) و در ۱۵ روز راه اندازی شدند و مقادیر SCOD و TCOD قبل از بارگذاری و در انتهای آزمایش اندازه گیری شدند. مقادیر متان تجمعی آزمایشگاهی با کمک نرم افزار متلب بر معادلات نمایی، گومپرتز تغییر شکل یافته و لاجستیک برازش شدند و بهترین مدل از لحاظ بیش ترین مقدار R^2 و کم ترین مقدار RMSE و SSE مشخص شد.

یافته ها: بر اساس نتایج، بهترین عملکرد هضم بی هوازی، بیش ترین مقدار SCOD/TCOD% و بیش ترین تولید متان در توان مایکروویو ۶۳۰ وات و در مدت زمان تابش ۳۰۰ ثانیه به دست آمد. هم چنین همه منحنی های تولید متان تجمعی با مدل های 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 می یابد. مقدار کاهش TS و VS با افزایش توان و زمان تابش مایکروویو افزایش می یابد. هم چنین مدل گومپرتز تغییر شکل یافته، مدلی جامع و انعطاف پذیر می باشد که به خوبی با داده های آزمایشگاهی برازش می شود و بیش ترین مقدار R^2 و کم ترین مقدار RMSE و SSE را نتیجه می دهد.

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

مقدمه

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

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

مولف مسئول: حسین حاجی آقا علیزاده - همدان: دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده کشاورزی، گروه بیوسستم

۱. استادیار، گروه بیوسستم؛ 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 بیوسستم، 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

ذرات غیر قابل تجزیه و ارگانسیم‌های زنده است. در چند دهه گذشته مخلوط پسماندهای مواد غذایی پسماندهای جامد شهری برای تولید گرما یا انرژی مورد استفاده قرار می‌گرفتند (۲،۱). فرآیند هضم بی‌هوازی پسماندهای مواد آلی یکی از مهم‌ترین 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، استازن و متانوژن می‌باشد. هیدرولیز به عنوان مرحله محدودکننده برای هضم بی‌هوازی می‌باشد. در هضم بی‌هوازی، میکروارگانسیم‌ها، مواد آلی (چربی‌ها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها) را در مرحله متنازایی 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 آماده‌سازی، مولکول‌های بزرگ و پیچیده را به مولکول‌های کوچک‌تر و با ساختار ساده‌تر تبدیل می‌کند تا به راحتی در دسترس میکروارگانسیم‌ها 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 به کار می‌رود که به منظور آماده کردن پسماندهای مواد غذایی در تولید محیط زیست 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 به وسیله تابش مایکروویو توانایی شکستن پیوندهای شیمیایی را ندارد در حالی که پیوندهای هیدروژن می‌توانند شکسته شوند (۶). تابش مایکروویو می‌تواند اثرات گرمایی و غیر گرمایی 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. ال‌گروودی 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.

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 هر کدام از ترکیبات مشخص شد. سپس این ترکیبات به صورت جداگانه توسط غذاساز دستی در ابعاد ۱ تا ۵ میلی متر خرد شدند و در نهایت کاملاً با هم مخلوط گردیدند. آماده سازی توسط میکروویو قبل از تغذیه راکتورها انجام شد. به منظور آماده سازی پسماند مواد غذایی از میکروویو خانگی (Model: R-677, Sharp Electronics, UK) استفاده شد. در هر مخزن شیشه ای، مقادیر ۳۵۰ گرم پسماند و ۳۵۰ گرم آب با هم مخلوط شده و توسط میکروویو با توان های ۴۵۰ و ۶۳۰ وات و در مدت زمان های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه در معرض تابش قرار گرفت. بعد از آماده سازی، نمونه ها در دمای اتاق نگهداری شدند تا به دمای محیط آزمایشگاه برسند و به منظور جلوگیری از تبخیر مواد آماده شده، درب مخزن شیشه ای کاملاً آبنبد 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.

هاضم ها (راکتورها) و شرایط آزمایش

۱- آماده سازی و آنالیز راکتورها جهت تولید متان

ترکیبات با غذا ساز دستی به ابعاد ۱ تا ۵ میلی متر خرد شدند و سپس تا حد امکان کاملاً با هم مخلوط شدند تا مخلوطی تقریباً همگن ایجاد شود. مقدار ۳۵۰ گرم از این مخلوط همگن را در داخل بطری های شیشه ای ریخته و به مقدار ۳۵۰ گرم آب به بطری اضافه شد. هفت

عدد راکتور (مخزن شیشه ای) یک لیتری که دارای مخلوط ۳۵۰ گرم پسماند و ۳۵۰ گرم آب می باشد، تهیه شد (تصویر شماره ۱). یکی از راکتورها بدون آماده سازی توسط میکروویو (شاهد) و شش راکتور دیگر را توسط میکروویو در توان ها و زمان های مختلف آماده شدند. بعد از خارج کردن بطری ها از میکروویو، در دمای آزمایشگاه قرار داده شد تا با دمای محیط یکسان شود و سپس ۵۰ سی سی 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 میکروویو، به منظور تسریع در فرآیند هضم بی هوازی و تولید بیوگاز و متان، مقدار ۲۰ سی سی از محتوای شکمبه گوسفند به داخل هر یک از راکتورها اضافه گردید. این راکتورها به عنوان هاضم های بی هوازی با جریان هیدرولیکی ناپیوسته هستند و در داخل حمام آب گرم با دمای ۳۵ °C نگهداری شدند. سپس در طول مدت زمان ماند، مقدار بیوگاز و متان تولید شده در همه هاضم ها اندازه گیری شدند.

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

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



تصویر شماره ۱: هاضم بی هوازی با جریان هیدرولیکی ناپیوسته

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 و متغیرهای موجود در روابط در معادلات جدول شماره ۲ در جدول شماره ۳ توضیح داده شده است.

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

مدل	رابطه ریاضی
نمایی	$Y = S \cdot G \{1 - \exp[-M(t - \lambda)]\}$ $Y = S \cdot G \cdot \exp\left\{-\frac{B_r}{C_r} \exp(-C_r t) - \frac{B_s}{C_s} \exp(-C_s t)\right\}$
گومپرتز تغییر شکل یافته	
لاجستیک	$Y = \frac{A}{1 + \exp\left[\frac{4H_m}{A}(\lambda - t) + 2\right]}$

جدول شماره ۳: مشخصات پارامترهای مدل‌های 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
H _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

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 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 به دست آمد.

$$TS(\%) = (W_1 - W_0) / (W_2 - W_0) * 100 \quad (1)$$

$$VS(\%) = (W_2 - W_3) / (W_2 - W_0) * 100 \quad (2)$$

وزن ظرف (W₀) بر حسب گرم

وزن ظرف و ماده قبل از خشک شدن در دمای

۱۰۵ درجه (W₁) بر حسب گرم

وزن نهایی ظرف و نمونه بعد از خشک شدن در دمای

۱۰۵ درجه (W₂) بر حسب گرم

وزن نهایی ظرف و نمونه بعد از خشک شدن در دمای

۵۵۰ درجه (W₃) بر حسب گرم

$$TS_{\text{removed}} \% = \frac{TS_{\text{initial}} - TS_{\text{final}}}{TS_{\text{initial}}} \times 100 \quad (5)$$

$$VS_{\text{removed}} \% = \frac{VS_{\text{initial}} - VS_{\text{final}}}{VS_{\text{initial}}} \times 100 \quad (6)$$

مقادیر TS_{initial} و TS_{final} نشان دهنده مقادیر ماده جامد کل پسماند مواد غذایی قبل از ورود به راکتور و بعد از خارج شدن از راکتور می باشد و مقادیر VS_{initial} و VS_{final} نشان دهنده مقادیر جامد فرار پسماند مواد غذایی قبل از ورود به راکتور و بعد از خارج شدن از راکتور می باشد.

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 توان های مختلف در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول شماره ۴، مقادیر TS و VS در تمام آزمایش های آماده سازی شده توسط مایکروویو نسبت به آزمایش بدون آماده سازی (شاهد)، به مقدار بیش تری کاهش یافته است. به عبارت دیگر مقادیر TS و VS متناسب با افزایش توان مایکروویو و زمان تابش کاهش می یابد. بیش ترین مقدار کاهش TS و VS در آماده سازی با توان ۴۵۰ وات به ترتیب در زمان های ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ ثانیه به دست آمد و بیش ترین مقدار کاهش TS و VS در آماده سازی با توان ۶۳۰ وات نیز به

روش برای به حداقل رساندن میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده استفاده می شود. به منظور تعیین مقدار μ_m ، الگوریتم مارکوارت به طور خودکار مقادیر ابتدایی را به روش جستجوی بیش ترین شیب منحنی بین چهار نقطه محاسبه می کند و مقدار λ به روش تقاطع خط مماس بر μ_m با محور X تخمین زده می شود. به طور کلی الگوریتم، مجموعه پارامترهای معادلات را برای حداقل کردن مقادیر RMSE و SSE محاسبه می کند. برای تحلیل آماری معادلات از نرم افزار MATLAB 8.1[®] استفاده شده است. همچنین عملکرد تولید بیوگاز و متان از نسبت میزان تولید بیوگاز و متان به مقدار VS پسماند ورودی به راکتور محاسبه می شود که از رابطه ۳ و ۴ به دست می آیند (۱۴):

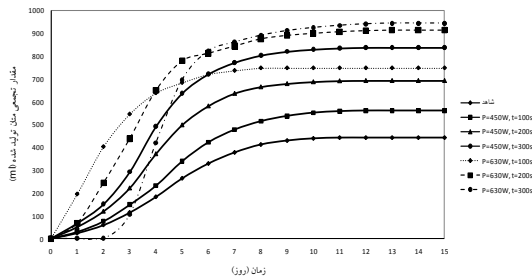
$$Y_{\text{biogas,rate}} = \frac{Y_{\text{biogas}}}{VS_{\text{in}}} \quad (3)$$

$$Y_{\text{CH}_4, \text{rate}} = \frac{Y_{\text{CH}_4}}{VS_{\text{in}}} \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴، VS_{in} مقدار جامد فرار پسماند مواد غذایی در هنگام تغذیه راکتور می باشد و Y_{CH_4} ، Y_{biogas} بیوگاز و متان تولید شده به طور روزانه بر حسب میلی لیتر می باشد. $Y_{\text{CH}_4, \text{rate}}$ ، $Y_{\text{biogas,rate}}$ عملکرد تولید بیوگاز و متان هستند که بر حسب $\text{ml}_{\text{biogas}} t_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ و $\text{ml}_{\text{methane}} t_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ می باشند. مقدار کاهش TS و VS از روابط ۵ و ۶ محاسبه می شوند (۱۴):

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



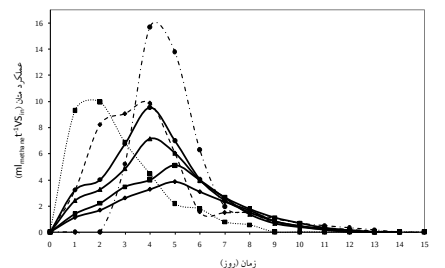
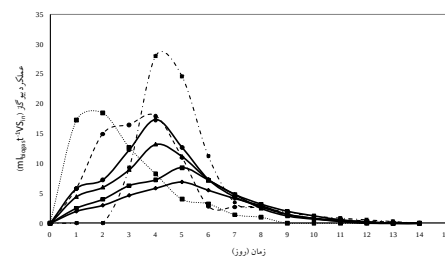
نمودار شماره ۲: مقدار تجمعی الف) بیوگاز ب) متان تولید شده در توان ها و زمان های تابش مختلف

براساس نمودار شماره ۱، مقدار عملکرد بیوگاز و متان در ابتدای آزمایش افزایش و سپس با گذشت زمان کاهش می یابد. در آزمایش شاهد، مقدار تولید بیوگاز و متان روزانه به ترتیب به $6/89 \text{ ml}_{\text{biogas}} \text{ t}_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ و $3/85 \text{ ml}_{\text{methane}} \text{ t}_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ افزایش می یابد و سپس تا پایان آزمایش روند نزولی دارد. مقدار عملکرد تولید بیوگاز روزانه در آماده سازی پسماند با توان ۴۵۰ وات و مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه به ترتیب تا ۹/۱۳، ۱۳/۲۱ و $17/35 \text{ ml}_{\text{biogas}} \text{ t}_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ افزایش می یابد و سپس با گذشت زمان کاهش می یابد. همچنین مقدار عملکرد تولید متان روزانه در آماده سازی پسماند با توان ۴۵۰ وات و مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه به ترتیب به $5/12$ ، $7/13$ و $9/54 \text{ ml}_{\text{methane}} \text{ t}_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ افزایش و سپس کاهش می یابد. در آماده سازی با توان ۶۳۰ وات و در مدت زمان های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه، مقدار عملکرد بیوگاز تولیدی روزانه به ترتیب تا $17/99$ ، $18/5$ و $28/04 \text{ ml}_{\text{biogas}} \text{ t}_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ افزایش و سپس کاهش می یابد. همچنین مقدار عملکرد تولید متان روزانه در آماده سازی پسماند با توان ۶۳۰ وات در مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه به ترتیب به $9/99$ ، $9/89$ و $15/7 \text{ ml}_{\text{methane}} \text{ t}_{\text{VS}_{\text{in}}}^{-1}$ افزایش و سپس کاهش می یابد. به عبارت دیگر، افزایش تولید بیوگاز و متان روزانه موجب افزایش عملکرد تولید بیوگاز و متان می گردد. بر اساس نمودار شماره ۲، بیشترین مقدار بیوگاز و متان تجمعی تولید شده در آماده سازی با توان ۶۳۰ وات و در مدت زمان تابش ۳۰۰ ثانیه، مقادیر ۱۷۵۱

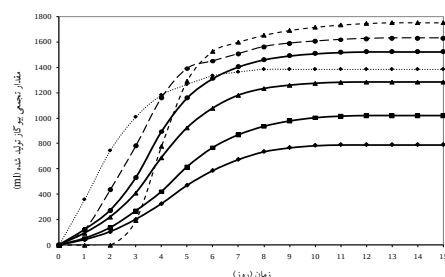
ترتیب در زمان های ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ ثانیه به دست آمد. به طور کلی مقدار کاهش TS و VS در آماده سازی با توان ۶۳۰ وات نسبت به آماده سازی با توان ۴۵۰ وات بیش تر است. مقدار درصد حلالیت پسماند مواد غذایی (SCOD/TCOD%) در شرایط آماده سازی توسط مایکروویو نسبت به آزمایش شاهد بیش تر است. به طور کلی مقدار (SCOD/TCOD%) در آماده سازی با توان ۶۳۰ وات بیش تر از آماده سازی با توان ۴۵۰ وات می باشد. به عبارت دیگر با افزایش توان مایکروویو و زمان تابش مقدار (SCOD/TCOD%) در پسماند مواد غذایی نیز افزایش می یابد.

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 تولید شده در توان ها و زمان های تابش مختلف



و ۹۴۵/۵۴ میلی لیتر به دست آمد. در آماده سازی با توان ۶۳۰ وات و در مدت زمان های تابش ۱۰۰ و ۲۰۰، مقادیر بیوگاز و متان تجمعی به ترتیب ۱۳۸۵ و ۷۴۸ میلی لیتر و ۱۶۳۱ و ۹۱۳ میلی لیتر به دست آمد. در آماده سازی با توان ۴۵۰ وات و در مدت زمان تابش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه، مقادیر بیوگاز و متان تجمعی به ترتیب ۱۰۲۰ و ۵۶۱ میلی لیتر، ۱۲۸۳ و ۶۹۳ میلی لیتر و ۱۵۳۲ و ۸۳۸ به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، هرچه توان مایکروویو و مدت زمان تابش اشعه مایکروویو بیش تر باشد، مقدار بیوگاز و متان تولید شده نیز بیش تر خواهد شد.

داده های آزمایشگاهی استفاده شد. مدل های با نرم افزار ATLAB 8.1[®] برازش شدند و مقادیر ضرایب R^2 ، RMSE و SSE در جدول های شماره ۵ و ۶ گزارش داده شدند.

مدل های لاجستیک و تغییر شکل یافته گومپرتز، برازش مدل ها را با داده های آزمایشگاهی با کم ترین مقادیر RMSE و SSE و بیش ترین مقادیر R^2 به خوبی انجام دادند. در این تحقیق، در آماده سازی پسماند با میکروویو با توان ۶۳۰ وات و مدت زمان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه مدل تغییر شکل یافته گومپرتز با کم ترین مقدار RMSE و بیش ترین مقادیر R^2 برازش می کند.

بحث

۱- تاثیر آماده سازی بر خصوصیات پسماند مواد غذایی
افزایش توان و زمان تابش موجب افزایش دما و کاهش مقدار VS و TS می شود. مقدار کاهش به این

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 مدل ها با

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		
			۳۰۰S	۲۰۰S	۱۰۰S	۳۰۰S	۲۰۰S	۱۰۰S
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		
			۳۰۰S	۲۰۰S	۱۰۰S	۳۰۰S	۲۰۰S	۱۰۰S
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

علت است که ترکیبات مواد آلی موجود در پسماند واد غذایی در شیرآبه محلول می شود و توسط میکروارگانیزم ها در دماهای بالاتر بهتر تجزیه می شوند (۱۵). پارامتر $SCOD/TCOD\%$ نشان می دهد که چند درصد از پسماند مواد جامد به مواد آلی محلول در راکتور تبدیل شده است. هر چه مقدار این پارامتر بیش تر باشد، نشان دهنده این است که مواد آلی محلول بیش تری در دسترس میکروارگانیزم ها قرار می گیرد و در نتیجه باعث افزایش تولید بیوگاز می شود. مقدار $SCOD/TCOD\%$ متناسب با افزایش توان مایکروویو و زمان تابش آن افزایش می یابد. هم چنین مقدار تغییرات نسبت $SCOD/TCOD\%$ به نوع مواد پسماند مواد غذایی استفاده شده و دمای آماده سازی توسط مایکروویو بستگی دارد (۱۶). آماده سازی های حرارتی مانند آماده سازی توسط مایکروویو موجب تخریب سلولی مواد غذایی می گردد و موجب آزادسازی آنزیم ها و ترکیبات آلی از پروتوپلاسم می شود که در نتیجه باعث افزایش محلولیت پسماندها در شیرآبه و افزایش نسبت $SCOD/TCOD\%$ پسماند مواد غذایی می شود (۱۷-۱۹). افزایش دما موجب افزایش فشار داخلی سلولی می گردد و در نهایت موجب تخریب ساختار سلولی می شود و ساختارهای پیچیده و بلند را به ساختارهای کوچک تر تبدیل می کند (۱۸، ۱۹). به عبارت دیگر آماده سازی توسط مایکروویو موجب تضعیف نیروهای واندروالسی بین مولکول ها و پیوندهای هیدروژنی می شود و باعث افزایش ترکیبات محلول می گردد (۵). لذا با افزایش توان و زمان تابش، دمای فرآیند آماده سازی توسط مایکروویو افزایش می یابد و باعث تخریب دیواره سلولی پسماند مواد غذایی می شود و در نهایت موجب افزایش محلولیت مواد $SCOD/TCOD\%$ می گردد.

۲- تاثیر آماده سازی بر عملکرد تولید متان

افزایش زمان تابش و توان مایکروویو موجب تخریب ساختار سلولی پسماند مواد غذایی می شود و ساختارهای پیچیده و بلند را به ساختارهای کوچک تر تبدیل می کند و هم چنین موجب آزاد سازی آنزیم ها و

ترکیبات آلی از پروتوپلاسم می شود و در نتیجه دسترسی میکروارگانیزم ها به مواد غذایی راحت تر می شود و تولید متان و بیوگاز روزانه نیز افزایش می یابد (۱۹). در ابتدای آزمایش، ترکیبات جامد به راحتی و به مقدار کافی در دسترس میکروارگانیزم های بی هوازی قرار دارد و در نتیجه باعث افزایش تولید متان و بیوگاز در مراحل اولیه آزمایش می گردد. با گذشت زمان ترکیبات محلول آلی موجود در شیرآبه کم می شود و در نتیجه مواد آلی قابل دسترس میکروارگانیزم ها کاهش می یابد که باعث کاهش تولید بیوگاز و متان می گردد. بر اساس نمودار شماره ۱ و ۲، به دلیل کاهش تولید بیوگاز و متان، قسمت انتهایی منحنی تجمعی بیوگاز و متان به صورت افقی می باشد که نشانه اتمام آزمایش می باشد. بر اساس نتایج جدول شماره ۵ و ۶، مدل لاجستیک و نمایی در نمودارهایی که زمان تاخیر در تولید بیوگاز و متان ندارد، بخوبی برازش می کند ولی در نمودارهایی که زمان تاخیر دارد، ابتدا و انتهای نمودار را مانند مدل گومپرتز تغییر شکل یافته، به خوبی برازش نمی کند. مدل نمایی در برازش داده های آزمایشگاهی بیش ترین مقدار $RMSE$ و SSE و کم ترین مقدار R^2 را دارا می باشد. زیرا مدل نمایی براین اساس فرض شده است که سرعت تخمیر و تجزیه مواد بعد از زمان تاخیر به سرعت افزایش می یابد که این امر موجب افزایش مقدار $RMSE$ و SSE و کاهش مقدار R^2 می شود (۲۱). به طور کلی مدل گومپرتز تغییر شکل یافته، مدلی جامع و انعطاف پذیر برای هر نموداری می باشد و نواقص مدل های لاجستیک و نمایی را در شرایط مختلف آزمایشگاهی ندارد. مدل گومپرتز تغییر شکل یافته داده های آزمایشگاهی را در زمان تاخیر و داده های انتهایی را به خوبی برازش می کند.

سپاسگزاری

این تحقیق حاصل پایان نامه مقطع دکتری با شماره ثبت ۱۱۶۹۶۸۳ است. بدین وسیله نویسندگان این مقاله از

TCOD و ریاست محترم شرکت گاز همدان جهت آنالیز بیوگاز تشکر و قدردانی می نمایند.

ریاست محترم دانشکده مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی همدان جهت آنالیز مقادیر SCOD و

References

- 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.
- 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).
- 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).
- 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.
- Marin J, Kennedy KJ, Eskicioglu C. Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste. *Waste Manag* 2010; 30(10): 1772-1779.
- 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.
- Elagroudy S, El-Gohary F. Properties of Waste Activated Sludge after Microwave Pretreatment. *Int J Thermal & Environmental Engineering* 2013; 5(2): 105-111.
- Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, Neis U. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization. *Water Res* 2001; 35(8): 2003-2009.
- 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.
- 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.
- American Public Association (APHA). Standard methods for the test of water and wastewater, 19th ed. USA, Washington DC: American Public Health Association; 1995.
- 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.
- Zwietering MH, Jongenburger I, Rombouts FM, Van'triet K. Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Appl Environ Microbiol* 1990; 56(6): 1875-1881.
- Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Richtlinie: VDI 4631 Gütekriterien für Biogasanlagen. (Quality criteria for biogas plants). Berlin: *Beuth Verlag GmbH* 27.190 (4631).2011.
- Dogan E, Dunaev T, Erguder TH and Demirel GN. Performance of leaching bed reactor converting the organic fraction of municipal solid waste to organic acids and

- 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 ruminal fluid. J Anim Sci 1993; 71(4): 1041-1046.