

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

Hossein Haji Agha Alizadeh<sup>1</sup>, Rahman Seifi<sup>2</sup>, Seyed Abbas Radmard<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>3</sup> 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<sup>2</sup> 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<sub>removed</sub> and VS<sub>removed</sub> 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<sup>2</sup> value and the lowest RMSE and SSE.

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

## 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<sup>۱</sup>، رحمن سیفی<sup>۲</sup>، سید عباس رادمرد<sup>۳</sup>

### 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

**مؤلف 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

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 قطبی‌سازی 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 آماده‌سازی 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.

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 (۴،۵). 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 محیط‌زیست پاک و تولیدات با

## 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 مایکروویو قبل از تغذیه راکتورها انجام شد. به منظور آماده سازی 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 از آماده 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 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.

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 آماده سازی 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 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 مایکروویو، به منظور تسریع در فرآیند هضم بی‌هوازی 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 هاضم‌های بی‌هوازی 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 هاضم‌ها اندازه گیری 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 بی‌هوازی با جریان هیدرولیکی ناپیوسته

هاضم‌ها (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 بطری‌های شیشه‌ای ریخته و به مقدار ۳۵۰ گرم آب به بطری اضافه شد. هفت

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 اندازه گیری فشار و متان GMAS 1702 (شرکت رادپایا، ایران) اندازه گیری 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	$Y = S \cdot G \{1 - \exp[-M(t - \lambda)]\}$ $0 \quad \forall t < \lambda$
گومپرتز تغییر شکل یافته	$Y = S \cdot G \cdot \exp\left\{-\frac{B_r}{C_r} \exp(-C_r t) - \frac{B_s}{C_s} \exp(-C_s t)\right\}$
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 <sup>3</sup>
S	مقدار پسماند موجود در شروع تخمیر	kg
G	فاکتور ثابت عملکرد (حجم گاز تولید شده نسبت به مقدار پسماند)	mm <sup>3</sup> /kg
M, B, C	متغیر ثابت (تابع میزان تولید ویژه گاز)	d <sup>-1</sup>
t	زمان تخمیر در راکتور	d
$\lambda$	زمان تاخیر بین شروع تخمیر اولین زمان تولید گاز	d
B <sub>r</sub> , C <sub>r</sub>	متغیرهای ثابت (تابع میزان تولید ویژه گاز) مربوط به تولید سریع گاز در مدت زمان آغاز مراحل تخمیر	d <sup>-1</sup>
B <sub>s</sub> , C <sub>s</sub>	متغیرهای ثابت (تابع میزان تولید ویژه گاز) مربوط به تولید آهسته گاز در مدت زمان آغاز مراحل تخمیر	d <sup>-1</sup>
H <sub>m</sub>	بیشترین مقدار تولید ویژه گاز	d <sup>-1</sup>
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 اندازه گیری شدند. روش اندازه گیری 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 اندازه گیری TS بر اساس 2540 B (Total Solids Dried at 103–105°C) و روش اندازه گیری 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 اندازه گیری شدند و سپس در دستگاه اوون به مدت ۲۴ ساعت نگه داشته شد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، به منظور هم‌دما 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 (W<sub>0</sub>) بر حسب گرم

وزن ظرف و ماده قبل از خشک شدن در دمای

۱۰۵ درجه (W<sub>1</sub>) بر حسب گرم

وزن نهایی ظرف و نمونه بعد از خشک شدن در دمای

۱۰۵ درجه (W<sub>2</sub>) بر حسب گرم

وزن نهایی ظرف و نمونه بعد از خشک شدن در دمای

۵۵۰ درجه (W<sub>3</sub>) 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  $TS_{\text{initial}}$  و  $TS_{\text{final}}$  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  $VS_{\text{initial}}$  و  $VS_{\text{final}}$  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 میکروویو 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 میکروویو 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 میکروویو 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  $\mu_m$ ، الگوریتم مارکوارت به طور خودکار مقادیر ابتدایی را به روش جستجوی بیش ترین شیب منحنی بین چهار نقطه محاسبه می کند و مقدار  $\lambda$  به روش تقاطع خط مماس بر  $\mu_m$  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<sup>®</sup> 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):

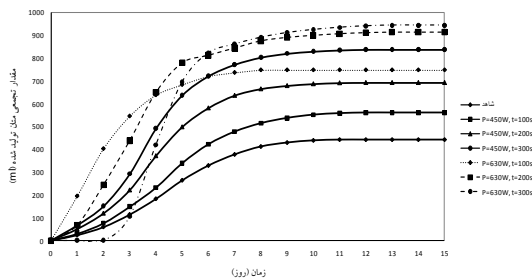
$$Y_{\text{biogas,rate}} = \frac{Y_{\text{biogas}}}{VS_{\text{in}}} \quad (3)$$

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

در روابط ۳ و ۴،  $VS_{\text{in}}$  مقدار جامد فرار پسماند مواد غذایی در هنگام تغذیه راکتور می باشد و  $Y_{\text{CH}_4}$ ،  $Y_{\text{biogas}}$  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  $ml_{\text{biogas}} t_{VS_{\text{in}}}^{-1}$  و  $ml_{\text{methane}} t_{VS_{\text{in}}}^{-1}$  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 میکروویو

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



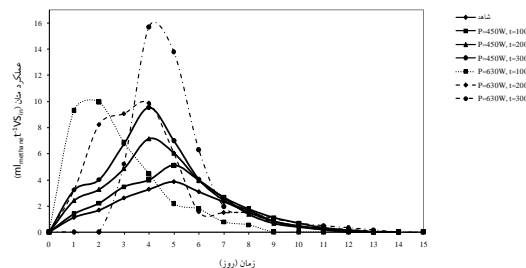
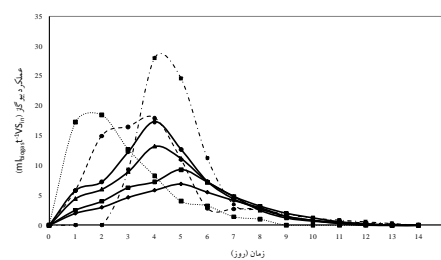
نمودار شماره ۲: مقدار تجمعی الف (بیوگاز ب) متان تولید شده در توان ها و زمان های تابش مختلف

بر اساس 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  $9/89$ ،  $9/99$  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

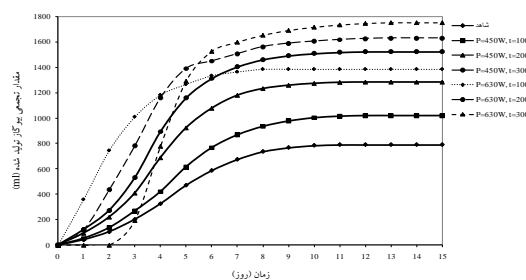
ترتیب در زمان های ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ ثانیه به دست آمد. به طور کلی مقدار کاهش VS و TS در آماده سازی با توان ۶۳۰ وات نسبت به آماده سازی با توان ۴۵۰ وات بیش تر است. مقدار درصد حلالیت پسماند مواد غذایی (SCOD/TCOD%) در شرایط آماده سازی توسط مایکروویو نسبت به آزمایش شاهد بیش تر است. به طور کلی مقدار (SCOD/TCOD%)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



داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. مدل‌های با نرم‌افزار ATLAB 8.1<sup>®</sup> 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 تغییر شکل 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

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 میکروویو و مدت زمان تابش اشعه میکروویو 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

جدول شماره ۵: ضرایب  $R^2$ ، RMSE و SSE در مدل‌های نمایی، تغییر شکل یافته گومپرتز و لاجستیک در تولید بیوگاز و در توان‌ها و زمان‌های مختلف میکروویو

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

جدول شماره ۶: ضرایب  $R^2$ ، RMSE و SSE در مدل‌های نمایی، گومپرتز تغییر شکل یافته و لاجستیک در تولید متان و در توان‌ها و زمان‌های مختلف میکروویو

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



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

## 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 می‌نمایند.

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, 19<sup>th</sup> ed. USA, Washington DC: American Public Health Association; 1995.
- Griender 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.