

## Optimization of sugarcane bagasse fast pyrolysis conditions using response surface method

N. Norouzi<sup>1</sup>, Sh. Ghavami Jolandan<sup>2\*</sup>, M. J. Sheikh Davoodi<sup>3</sup> and S.M. Safieddin Ardabili<sup>4</sup>

1. Master of Science, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
2. Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
3. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
4. Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 28 May 2020

Accepted: 16 August 2020

### Abstract

**Introduction:** Today, with advances in all sciences, we must always look for a way best use plant residues and turn them into valuable products. A consequence of improving family life standards and consistent industrial development is a higher demand for energy usage. Nowadays, agricultural residues are produced in huge quantities and could be considered as a promising source for renewable energy generation. Bagasse is one of the major sources of sugarcane production. The production of valuable products from Bagas, in addition to having economic benefits, can reduce the environmental damage caused by burning them. In recent years, there has been an increasing trend in the utilization of sugarcane bagasse as a major by-product of the sugarcane industry. Another very valuable substance produced from sugarcane bagasse, which we will discuss in this study, is bio compressed coal. Valorization of sugarcane bagasse to engineered biochar using hydrothermal carbonization (HTC) presents a perspective source to substitute conventional fossil fuels. HTC process offers the benefits of converting the sugarcane bagasse into biochar and bio-oil. In this process, biomass is usually conducted in the temperature range of 180–250 °C. HTC technique is promoted as one way of reducing carbon dioxide (CO) emissions, which mostly generated through open burning of crop residues. Besides the utilization of power/heat generation for sugarcane industries, bagasse may find other potential applications, for instance: electricity generation, biogas production, livestock feed/compost production, and also bioethanol production. The unique features of biochar generated through HTC process are its portability, high volumetric energy density, hydrophobicity, and wear ability.

**Materials and Methods:** In this research, sugarcane waste was obtained from Hakim Farabi Sugarcane Cultivation and Industry Company in Ahvaz. The hydrothermal carbonization process was performed in a batch reactor at Shahid Chamran University of Ahvaz. The parameters studied in this study include the retention time of the material inside the reactor (30, 75, and 120



minutes), bagasse mass to water ratio (0.15, 0.20, and 0.30) and the pressure inside the reactor (10, 12.5 and 15 bar). In order to measure the pressure, a Nuova FiMa barometer was used, which was able to measure the pressure values up to 25 bar. A temperature control system model HANYoung ED6 was used, which was equipped with a ceramic heater with a diameter of 230 mm and a height of 230 mm to provide heat for the process. The PARR1266 calorie bomb device was employed to measure the calorific value of the samples. The moisture content of the samples was also measured using ASTM-2010a standard. In this experimental work, the response surface method was employed to investigate the effect of input parameters (i.e., pressure, residence time, and water-to-biomass) on the response parameter (i.e., HHV and energy consumption). Design Expert ver.10 software was used to predict the corresponding models. The obtained models provided a good relationship between the independent/dependent parameters.

**Results and Discussion:** The HTC process was analyzed using a Response Surface Method to derive predicted models for the HHV and energy parameters. The results obtained showed that all provided models could successfully predict the HTC process. According to the results, the models developed were statistically significant at the level of 1%. The multi-regression models between the input/response variables were obtained as second-order quadratic equations. The F-value for the residence time, water-to-bagasse, and pressure were 2417, 286, and 1185, respectively. The value of F-value of each derived model indicates the significance of the studied parameters. The parameters of water-to-bagasse and pressure had a more significant effect compared to the residence time factor. The R-square value for this study was achieved as 0.0996, indicating that the proposed model was able to evaluate the experimental data thoroughly. A multi-objective optimization technique was used to achieve an optimal HTC process condition with the maximum possible amount of desirability value.

**Conclusion:** The optimum amount of water-to-bagasse, pressure, and residence time was calculated using the response surface techniques. A pressure of 11 bar, the residence time of 38 min, and water-to-bagasse of 0.15 were found to be optimal values. The findings of this study indicate that at optimal input variables, the value of calorific value and used energy was 21 MJ/kg and 0.09 kWh, respectively.

**Key words:** *Hydrothermal carbonization, sugarcane bagasse, response surface method, optimization*

## بهینه سازی فرآیند پیرولیز سریع ضایعات نیشر به کمک روش سطح پاسخ

نیما نوروزی<sup>۱</sup>، شعبان قوامی جولندان<sup>۲\*</sup>، محمد جواد شیخ داودی<sup>۳</sup> و سید محمد صفی الدین اردبیلی<sup>۴</sup>

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۳- استاد بازنشسته گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۴- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶

## کلمات کلیدی:

پیرولیز سریع،

ضایعات نیشر،

روش سطح پاسخ،

بهینه‌سازی،

## چکیده

در حال حاضر زیست توده به عنوان منبعی اقتصادی و تجدید پذیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. تولید زغال زیستی از منابع زیست توده می‌تواند علاوه بر تولید انرژی از این منابع، از اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از استفاده بی رویه سوخت‌های فسیلی نیز بکاهد. در این تحقیق به بررسی فرآیند پیرولیز در حضور آب در شرایط بحرانی، دما و فشارهای بالا که به اصطلاح کربونیزه کردن هیدروترمال می‌نامند، جهت تولید زغال زیستی از باگاس نیشر که از ضایعات نیشر می‌باشد، پرداخته شد. عوامل مورد مطالعه در این تحقیق شامل زمان ماند مواد درون رآکتور (۳۰، ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه)، نسبت جرمی باگاس به آب (۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۳۰) و فشار درون رآکتور (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ بار) بود. در این تحقیق از روش باکس بنکن به منظور طراحی آزمایش‌ها استفاده شد و همچنین جهت یافتن شرایط عملکردی رآکتور از روش سطح پاسخ استفاده گردید. بر اساس نتایج بدست آمده، میزان نسبت جرمی باگاس به آب معادل ۰/۱۵، زمان ماند ۳۸ دقیقه و فشار ۱۱ بار به عنوان نقطه بهینه عملکردی سامانه پیرولیز سریع انتخاب شدند. برای این نقطه بهینه، میزان ارزش حرارتی بالای نمونه‌ها معادل ۲۱ Mj/kg و میزان انرژی مصرفی سامانه برابر ۰/۰۹ kwh به دست آمد.

\* عهده‌دار مکاتبات

Email: s.ghavami@scu.ac.ir

## مقدمه

امروزه افزایش روزافزون جمعیت نیاز بشر را به محصولات کشاورزی افزایش داده است. از طرفی، افزایش تولید محصولات کشاورزی، باعث تولید میزان ضایعات زیادی در این بخش شده است. این ضایعات که از آن به عنوان زیست توده نامبرده می‌شود، به دلیل هزینه‌ی ناچیز و در دسترس بودن، بهترین جایگزین برای سوخت‌های فسیلی به شمار می‌روند (۵ و ۲۶). تبدیل

منابع زیست توده به انرژی‌های تجدید پذیر و همچنین محصولات شیمیایی مختلف به طور عمده از طریق فرآیندهای حرارتی- شیمیایی نظیر پیرولیز<sup>۱</sup> و گاززدایی<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد (۲۷ و ۳۲).

1- Pyrolysis  
2- Gasification

ساقه گندم و پونه کوهی پرداختند. میزان درصد روغن-زیستی استخراج شده از این ضایعات بین ۳۵ تا ۴۱ درصد گزارش گردید (۳۰). در تحقیق دیگری نیز به بررسی پیرولیز چهار نمونه از ضایعات کشاورزی شامل ساقه گندم، ذرت، برنج و همچنین پوسته برنج پرداخته شد. در این تحقیق، فرآیند پیرولیز در چهار سطح دمایی شامل ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سلسیوس انجام گرفت. مقادیر بهینه دما ۴۰۰ درجه و میزان بازده تولید روغن زیستی ۴۷/۳ درصد گزارش شد (۶). در تحقیق دیگری نیز توسط زانزی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۲)، به بررسی عوامل موثر در فرآیند پیرولیز شامل نرخ افزایش دما، دمای رآکتور و اندازه ذرات پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد، دمای بالای رآکتور و ذرات کوچک تر می توانند بر نرخ انتقال حرارت در فرآیند پیرولیز اثر گذاشته و در نتیجه میزان بازده تولید زغال زیستی را کاهش دهند (۳۱). تحقیقات بسیاری در زمینه پیرولیز سریع نشان داد، این تحقیقات به طور میانگین در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس انجام شده و هدف آنها بیشتر تولید سوخت زیستی مایع بوده است (۱۸).

با مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه پیرولیز، می توان دریافت که عوامل بسیاری می توانند بر بازده عملکردی این فرآیند اثر مستقیم داشته باشند (۴ و ۱۰). از این رو، یک تحلیل چند متغیره سیستماتیک<sup>۷</sup> می تواند دانش دقیق و کاملی را درباره پارامترهای عملکردی فرآیند پیرولیز در مقایسه با روش یک متغیره فراهم آورد. در مسایل چند متغیره، استفاده از تکنیک های غیرخطی روش بسیار مناسب و اقتصادی برای بررسی اثرات متغیرهای مورد بررسی بر روی متغیر خروجی مورد آزمون می باشد (۲۱). امروزه روش سطح پاسخ<sup>۸</sup> (RSM) به عنوان مجموعه ای از روش های آماری و ریاضی، به عنوان روش بسیار کارآمد در مدل سازی و بهینه سازی مسائل مختلف مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد. روش سطح پاسخ به طور همزمان اثرات

پیرولیز فرآیندی است که طی آن تجزیه حرارتی زیست توده در غیاب اکسیژن و بدون حضور آب<sup>۱</sup> انجام می گیرد (۲۹). محصولات حاصل از این فرآیند شامل روغن زیستی<sup>۲</sup> (۱۵)، سینگاز<sup>۳</sup> (۲) و زغال زیستی<sup>۴</sup> (۱) می توانند به عنوان افزودنی سوخت در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده و بهره برداری قرار گیرند (۲۳).

کیفیت و میزان محصولات تولید شده توسط فرآیند پیرولیز به عوامل مختلفی نظیر شرایط فرآیند و نوع محصول استفاده شده بستگی دارد (۷ و ۱۳). منابع زیست توده مختلفی همچون فضولات حیوانی و انسانی، ضایعات محصولات کشاورزی، کاغذ، مقوا، ضایعات صنایع می تواند به عنوان مواد اولیه جهت تولید زغال زیستی استفاده شود (۹ و ۱۴). بسته به شرایط عملکردی، فرآیند پیرولیز به دو دسته پیرولیز آهسته و پیرولیز سریع تقسیم بندی می شود. پیرولیز آهسته به عنوان فناوری شناخته شده به طور عمده برای تولید کربن فعال و مواد شیمیایی نظیر متانول و اسید استیک مورد استفاده قرار می گیرد (۸ و ۳۰). هدف اصلی فرآیند پیرولیز سریع، تبدیل زیست توده به روغن زیستی در زمان کمتر می باشد (۱۱). در عمل، حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد از زیست توده به سوخت زیستی تبدیل می گردد. فرآیند پیرولیز سریع مزیت های بسیاری داشته و به عنوان روش کارآمد برای تولید زیست توده به سوخت های زیستی مایع به شمار می رود (۱۹). این سوخت ها قابلیت نگهداری و حمل و نقل آسان را داشته و براحتی می توانند به عنوان ماده اولیه برای تولید انرژی گرمایی و همچنین مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گیرند (۱۶ و ۲۰). تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه تبدیل ضایعات کشاورزی توسط فرآیند پیرولیز به مواد با ارزش افزوده بالاتر صورت گرفته است. به عنوان مثال، در تحقیقی، یانیک<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی فرآیند پیرولیز برای سه نوع ضایعات کشاورزی شامل ساقه ذرت،

- 1- Anhydrous
- 2- Bio-Oil
- 3- Syngas
- 4- Biochar
- 5- Yanik

6- Zanzi *et al.*

7- Systematic Multivariate Analysis

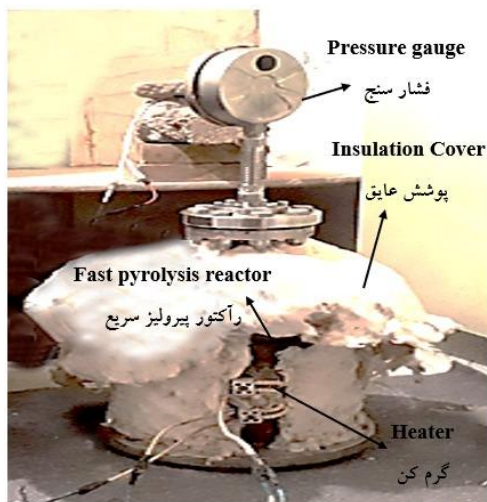
8- Response Surface Method

(HHV و میزان انرژی مصرفی) از روش سطح پاسخ استفاده شد. برای این منظور از نرم افزار Design xpert ver.10 استفاده گردید. متغیرهای تاثیرگذار و مدل‌های آماری برای بررسی دامنه تغییر عوامل ایجاد گردید. مدل‌های بدست آمده ارتباط بین عوامل مستقل و وابسته استفاده شده در این تحقیق را فراهم ساخت.

شکل کلی مدل آماری برای پیش‌بینی عامل  $Y$  بر اساس متغیرهای  $X_1, X_2, \dots, X_k$  در رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (1)$$

در این رابطه، تابع  $f$  تابع هدف بوده و در نهایت توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی خواهد شد. همچنین، پارامتر  $\varepsilon$  بیانگر متغیرهایی (میزان خطا) است که می‌توانند بر مقدار پارامتر  $Y$  تاثیرگذار باشند اما در تابع  $f$  در نظر گرفته نشده‌اند. رابطه ۲ برای تعیین یک مسئله رگرسیونی شکل‌های مختلفی دارد. شکل کلی یک تابع چند جمله‌ای درجه دوم در تحقیق حاضر به صورت رابطه ۲ می‌باشد:



شکل (۱) سامانه آزمایشگاهی فرآیند پیرولیز سریع  
Figure (1) Experimental apparatus of fast pyrolysis process

عوامل اثرگذار بر فرآیند (متغیرهای مستقل) و ارتباط بین پارامترهای پاسخ را به منظور دستیابی به بهترین عملکرد سامانه بررسی کرده و شرایط بهینه عملکرد را تعیین می‌کند (۲۴ و ۱۸). روش سطح پاسخ نسبت به سایر روش‌های آماری نظیر طرح فاکتوریل به زمان و میزان آزمایش‌های تجربی کمتری نیاز دارد (۳). در تحقیق حاضر، فرآیند پیرولیز سریع در سه سطح زمان ماند (۳۰، ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه)، فشار درون رآکتور (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ بار) و نسبت جرمی باگاس به آب (۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۳۰) مورد بررسی قرار گرفت. اثر عوامل ورودی زمان ماند، فشار و نسبت جرمی باگاس بر متغیر پاسخ میزان ارزش حرارتی<sup>۱</sup> (HHV) و انرژی مصرفی مورد بررسی قرار گرفت. از روش سطح پاسخ به منظور تحلیل نتایج و یافتن مقادیر بهینه پارامترهای مستقل و وابسته سامانه استفاده گردید.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق، ضایعات نیشکر از شرکت کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی تهیه شد. برای اندازه‌گیری داده‌های تجربی از سامانه پیرولیز سریع (شکل ۱) در دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده گردید.

در این سامانه به منظور اندازه‌گیری فشار از فشارسنج مدل Nuova FiMa ساخت کشور ایتالیا استفاده گردید. این فشارسنج قادر بود مقادیر فشار را تا محدوده ۲۵ bar اندازه‌گیری نماید. همچنین به منظور کنترل دما از سامانه کنترل دما مدل HANYOUNG ED6 ساخت کشور کره استفاده شد. این سامانه مجهز به گرمکن سرامیکی به قطر ۲۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۳۰ میلی‌متر جهت گرم کردن رآکتور پیرولیز بود. به منظور اندازه‌گیری ارزش حرارتی از دستگاه بمب کالری متر مدل PARR1266 ساخت کشور آمریکا استفاده گردید. مقدار رطوبت نمونه‌ها با استفاده از روش ASTM-2010a اندازه‌گیری گردید. همچنین، در این کار تجربی، به منظور بررسی اثر پارامترهای زمان ماند، فشار و نسبت جرمی باگاس به آب بر پارامترهای پاسخ

(۲)

$$HHV, Energy = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

کردن و بیشینه کردن متغیرهای خروجی به ترتیب از روابط ۳ و ۴ استفاده شد. در این رابطه‌ها PR متغیر پاسخ و W وزن‌های بکار رفته در فرآیند بهینه‌سازی می‌باشند.

### نتایج و بحث

همان‌طور که در بالا اشاره شد، تاثیر عوامل تجربی شامل نسبت جرمی، زمان ماند مواد و فشار درون رآکتور مورد آزمون قرار گرفت. شاخص‌های عملکردی شامل میزان انرژی مصرفی و HHV مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار سطح سه بعدی و دو بعدی بر اساس سه عامل مستقل به دست آمدند. مدل‌های تجربی به منظور یافتن ارتباط بین پارامترهای پاسخ و متغیرهای مستقل برآزش داده شد. در نهایت، بهینه‌سازی چند هدفه به کمک تابع مطلوبیت ارائه گردید. نتایج در ادامه نشان داده خواهد شد.

متغیرهای پاسخ (متغیر وابسته) در این تحقیق شامل HHV و میزان انرژی مصرفی فرآیند پیرولیز سریع بود. در رابطه ۲،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_i$ ،  $\beta_{ii}$  و  $\beta_{ij}$  به ترتیب ضرایب خطی، مربعی و اثر متقابل عوامل،  $X_i$  و  $X_j$  متغیرهای مستقل و  $\varepsilon$  خطای پیش‌بینی نشده می‌باشد. در این تحقیق از روش Box-Behnken به منظور طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. تعداد آزمایش به منظور انجام آزمون توسط نرم افزار پیشنهاد گردید. جدول ۱ متغیرهای مستقل و سطوح مورد استفاده در این کار پژوهشی را نشان می‌دهد.

تعداد ۳۰ آزمایش برای انجام آزمون توسط نرم‌افزار پیشنهاد داده شد. رگرسیون چند متغیره به منظور پیش‌بینی تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از مدل‌های معنی‌دار، ارتباط میان عوامل مستقل و وابسته تعیین گردید. در فرآیند بهینه‌سازی به منظور کمینه

جدول (۱) عوامل مستقل مورد استفاده و سطوح آن‌ها

Table (1) Independent parameters and their corresponding levels

عوامل مستقل Independent parameters	$X_i$	سطوح عوامل Parameter levels		
		+1	0	-1
نسبت جرمی باگاس به آب water-to-bagasse mass ratio	$X_1$	0.15	0.20	0.30
زمان ماند مواد (دقیقه) Retention time (min)	$X_2$	30	75	120
فشار درون رآکتور (بار) Pressure (bar)	$X_3$	10	12.5	15

$$df_i = \begin{cases} 0 & \text{if: } PR_i \leq PR_i^{min} \\ \left( \frac{PR_i - PR_i^{min}}{PR_i^{max} - PR_i^{min}} \right) w_i & \text{if: } PR_i^{min} \leq PR_i \leq PR_i^{max} \\ 1 & \text{if: } PR_i \geq PR_i^{max} \end{cases} \quad (3)$$

$$df_i = \begin{cases} 1 & \text{if: } PR_i \leq PR_i^{min} \\ \left(\frac{PR_i^{max} - PR_i}{PR_i^{max} - PR_i^{min}}\right)^{w_i} & \text{if: } PR_i^{min} \leq PR_i \leq PR_i^{max} \\ 0 & \text{if: } PR_i \geq PR_i^{max} \end{cases} \quad (۴)$$

شکل ۲ نمودارهای دو بعدی و سه بعدی اثر عوامل زمان ماند، فشار و نسبت جرمی باگاس به آب بر میزان HHV را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲-الف نشان داده شده است، با افزایش زمان ماند میزان ارزش حرارتی ابتدا افزایش و سپس روند کاهشی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق، با افزایش زمان ماند از ۳۰ به ۷۵ دقیقه میزان HHV حدود ۳/۴٪ افزایش نشان داد. با افزایش زمان ماند مواد درون رآکتور از ۷۵ دقیقه تا ۱۲۰ دقیقه این روند سیر کاهشی را نشان داد. بطوریکه با افزایش زمان ماند مواد از ۷۵ به ۱۲۰ دقیقه میزان ارزش حرارتی حدود ۴/۲٪ کاهش را نشان داد. بیشترین میزان HHV در زمان ماند ۷۵ دقیقه و معادل ۲۱ گزارش شد.

نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج مشاهده شده توسط سایر محققان هم خوانی داشت (۲۸ و ۱۲). همچنین، میزان نسبت باگاس باعث افزایش میزان ارزش حرارتی نمونه‌های خروجی از رآکتور شد. بطوریکه با افزایش نسبت باگاس به آب نمونه‌ها از ۰/۱۵ به ۰/۳، میزان HHV از ۲۰/۰۵ به ۲۱/۱۳ افزایش یافت. در حقیقت، افزایش نسبت آب به مواد جامد، باعث افزایش هدر رفت مواد جامد شده که این امر می‌تواند ناشی از تاثیر منفی آب موجود در نمونه‌ها باشد (۲۲).

### اثر نسبت جرمی باگاس به آب، زمان ماند مواد و فشار درون رآکتور پیرولیز بر میزان HHV

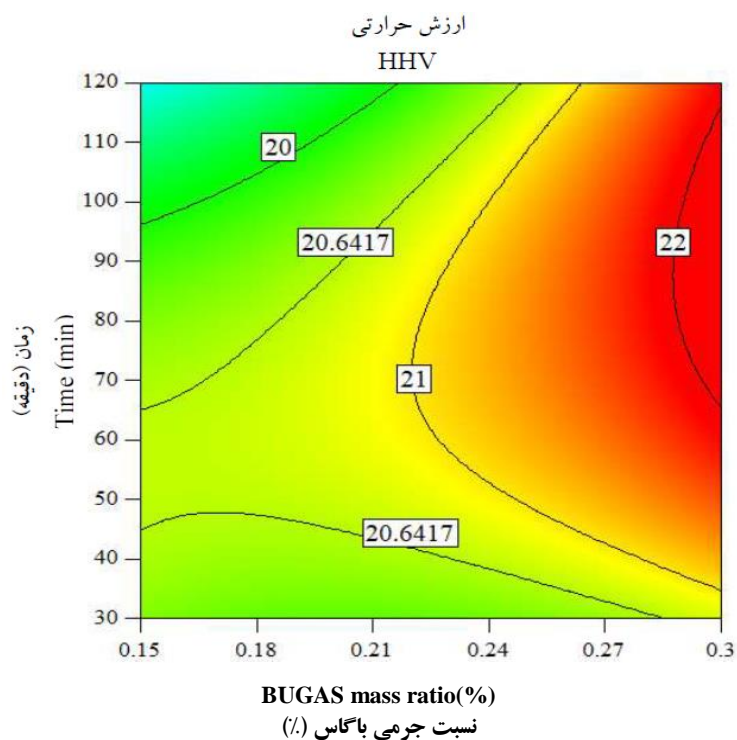
نتایج حاصل از تجزیه آماری برای فرآیند پیرولیز تحت شرایط عملکردی مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مدل‌های ارائه شده توسط نرم افزار سطح پاسخ به خوبی توانسته است تا بین داده‌های تجربی رابطه برقرار نماید. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۲ مدل در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، کلیه عوامل مورد مطالعه در این تحقیق در سطح ۱ درصد معنی‌دار بودند. مدل رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و توان به صورت معادله درجه ۲ در رابطه ۵ به دست آمد. بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۲، مقدار F برای عوامل نسبت جرمی، زمان ماند مواد و فشار درون رآکتور به ترتیب ۲۴۱۷، ۲۸۶ و ۱۱۸۵ به دست آمد. مقدار F میزان اهمیت و اثرگذاری پارامترها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، عامل نسبت جرمی به مواد جامد و میزان فشار درون رآکتور تاثیر بیشتری نسبت به عامل زمان ماند مواد داشت. میزان R-square برای این تحقیق معادل ۰/۰۹۹۶ به دست آمد که نشان دهنده این است که مدل ارائه شده توانسته است بخوبی داده‌های تجربی را برازش کند.

$$HHV = 21.05 - 1.16 X_1 - 0.4X_2 - 0.8X_3 + 0.64X_1X_2 + 0.69X_1X_3 + 0.6X_3X_2 + 0.29X_1^2 - 0.81X_2^2 - 1.25X_3^2 + 0.64X_1^2X_2 + 0.57X_1^2X_3 \quad (۵)$$

نوروزی و همکاران: بهینه سازی فرآیند پیرولیز سریع...

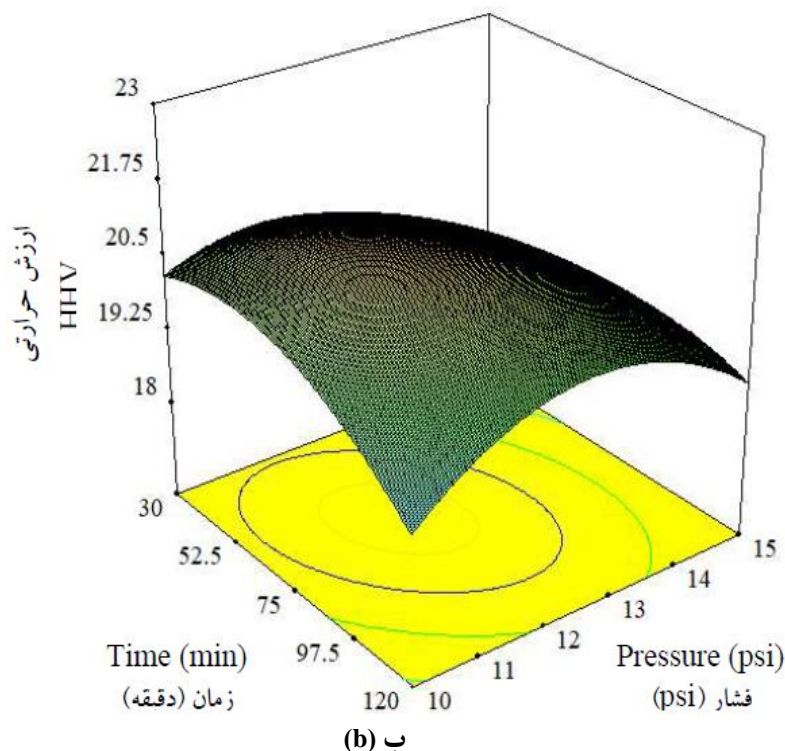
جدول (۲) نتایج آماری به دست آمده برای HHV  
Table (2) ANOVA results obtained for HHV

منابع تغییرات (Sources of variation)	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات (Sum of squares)	میانگین مربع (Mean square)	مقدار F (F-value)	مقدار P (P-value)
مدل (Model)	12	24.98	2.08	938.56	< 0.0001
X <sub>1</sub>	1	5.36	5.36	2417.43	< 0.0001
X <sub>2</sub>	1	0.63	0.63	286.00	< 0.0001
X <sub>3</sub>	1	2.63	2.63	1185.76	< 0.0001
X <sub>2</sub> × X <sub>1</sub>	1	1.66	1.66	749.98	< 0.0001
X <sub>2</sub> × X <sub>1</sub>	1	1.93	1.93	868.16	< 0.0001
X <sub>2</sub> × X <sub>1</sub>	1	1.45	1.45	652.97	< 0.0001
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	0.36	0.36	161.72	0.0002
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	2.77	2.77	1250.72	< 0.0001
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	6.55	6.55	2952.55	< 0.0001
X <sub>1</sub> <sup>2</sup> × X <sub>2</sub>	1	0.82	0.82	369.94	< 0.0001
X <sub>1</sub> <sup>2</sup> × X <sub>3</sub>	1	0.64	0.64	290.48	< 0.0001
X <sub>2</sub> <sup>2</sup> × X <sub>1</sub>	1	0.92	0.92	416.81	< 0.0001



الف (a)





شکل (۲) نمودار دو بعدی (الف) و سه بعدی (ب) اثر پارامترهای زمان ماند، فشار و نسبت باگاس به میزان HHV  
 Figure (2) 2D (a) and 3D (b) representations of the effect of residence time, pressure and the ratio of BAGASSE on the HHV

نتایج آماری به دست آمده از روش سطح پاسخ برای این پارامتر در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مدل پیش‌بینی شده برای داده‌های تجربی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود که نشان از دقت بالای مدل به دست آمده است. اثر عوامل نسبت جرمی باگاس به آب و فشار درون رآکتور در سطح ۵ درصد و عامل زمان در سطح ۱ درصد بر میزان انرژی سامانه معنی‌دار بودند. در بین این عوامل، عامل زمان مانند مواد درون رآکتور پیرولیز، بیشترین تاثیر را بر میزان مصرف انرژی داشت. درحالی‌که سایر عوامل اهمیت یکسانی را داشتند. مدل برازش شده دارای R-square معادل ۰/۹۸۴ بود که نشان دهنده این است که مدل ارائه شده می‌تواند با دقت بالایی و با کمتر از ۲ درصد خطا داده‌های تجربی را برازش نماید.

برای پارامتر فشار نیز روند مشابهی مانند زمان ماند مواد درون رآکتور گزارش گردید. بطوریکه با افزایش از ۱۰ به ۱۳ bar میزان ارزش حرارتی نمونه‌ها حدود ۲ درصد افزایش نشان داد. با ادامه روند افزایش فشار، این پارامتر اثر معکوس بر میزان ارزش حرارتی داشت. این روند کاهش در فشارهای بالاتر سیر نزولی بیشتری داشت. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، با افزایش فشار از ۱۰ به ۳۰ بار میزان ارزش حرارتی به ترتیب ۲۱/۰۶ و ۱۹/۲۹ به دست آمد. نتایج به دست آمده در این تحقیق با روند مشاهده شده در تحقیقات دیگر همخوانی داشت (۲۵ و ۱۷).

#### اثر نسبت جرمی باگاس، زمان ماند مواد و فشار درون رآکتور پیرولیز بر میزان انرژی مصرفی

مدل ارایه شده توسط روش سطح پاسخ برای میزان مصرف انرژی در رابطه ۶ نشان داده شده است. همچنین،

جدول (۳) نتایج آماری به دست آمده از روش سطح پاسخ برای میزان مصرف انرژی

Table (3) ANOVA results obtained from the response surface method for energy consumption

منابع تغییرات (Sources of variation)	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات (Sum of squares)	میانگین مربع (Mean square)	مقدار F (F-value)	مقدار P (P-value)
مدل (Model)	12	0.49	0.041	20.50	0.0051
X <sub>1</sub>	1	0.023	0.023	11.25	0.0285
X <sub>2</sub>	1	0.063	0.063	31.25	0.0050
X <sub>3</sub>	1	0.022	0.022	11.25	0.0285
X <sub>2</sub> × X <sub>1</sub>	1	0.023	0.023	11.25	0.0285
X <sub>2</sub> × X <sub>1</sub>	1	0.0025	0.0025	1.25	0.3262
X <sub>2</sub> × X <sub>1</sub>	1	0.0025	0.0025	1.25	0.3262
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	0.22	0.22	108.96	0.0005
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	0.025	0.025	12.64	0.0237
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	0.025	0.025	12.64	0.0237
X <sub>1</sub> <sup>2</sup> × X <sub>2</sub>	1	0.045	0.045	22.50	0.0090
X <sub>1</sub> <sup>2</sup> × X <sub>3</sub>	1	0.005	0.005	2.50	0.1890
X <sub>2</sub> <sup>2</sup> × X <sub>1</sub>	1	0.005	0.005	2.50	0.1890

$$Energy = 0.58 + 0.075 X_1 + 0.13 X_2 - 0.075 X_3 - 0.075 X_1 X_2 + \quad (۶)$$

$$0.025 X_1 X_3 - 0.025 X_2 X_3 - 0.23 X_1^2 - 0.077 X_2^2 - 0.078 X_3^2 - 0.15 X_1^2 X_2 -$$

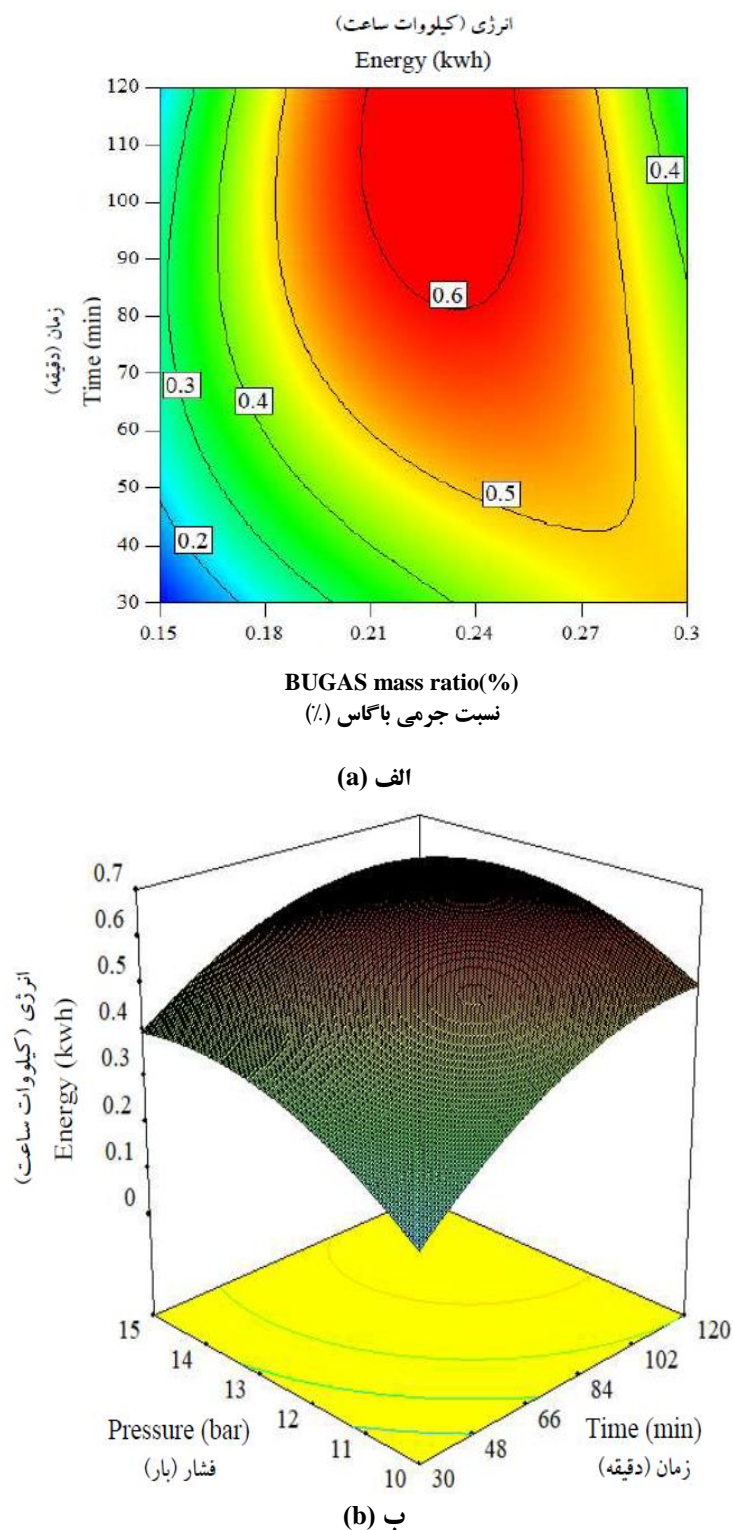
$$0.05 X_1^2 X_3$$

مصرفی از ۰/۲۸ kWh به ۰/۵۸ kWh افزایش یافت. بیشترین میزان مصرف انرژی در نسبت ۰/۲۴ و معادل ۰/۶ kWh به دست آمد.

#### بهینه‌سازی چند هدفه

نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ نشان داد، میزان نسبت باگاس به آب نمونه‌ها معادل ۰/۱۵، زمان ۳۸ دقیقه و فشار ۱۱ bar به عنوان نقطه بهینه عملکردی سامانه پیرولیز انتخاب شدند. برای این نقطه بهینه میزان ارزش حرارتی معادل ۲۱ MJ/kg و میزان انرژی برابر ۰/۰۹ kWh گزارش شد. شکل ۴ مقادیر مختلف تابع هدف را برای پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق نشان می‌دهد.

شکل ۳ نمودار دو بعدی و سه بعدی اثر عوامل فشار درون رآکتور، زمان ماند مواد، و همچنین میزان نسبت جرمی باگاس نمونه‌ها را بر میزان انرژی مصرفی فرآیند پیرولیز سریع ضایعات نیشکر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش زمان ماند مواد درون رآکتور میزان مصرف انرژی نیز به شیب تندی افزایش می‌یابد. بطوریکه با افزایش زمان ماند از ۳۰ به ۱۲۰ دقیقه میزان انرژی مصرفی حدود ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. این امر به دلیل مصرف انرژی الکتریکی بالای سامانه جهت رساندن به دمای مطلوب برای فرآیند پیرولیز بود. همچنین، با افزایش نسبت باگاس موجود در نمونه‌ها، میزان انرژی ابتدا افزایش و سپس روند کاهش را نشان می‌دهد. بطوریکه با افزایش نسبت باگاس به آب نمونه‌ها از ۰/۱۵ به ۰/۲۴ میزان انرژی

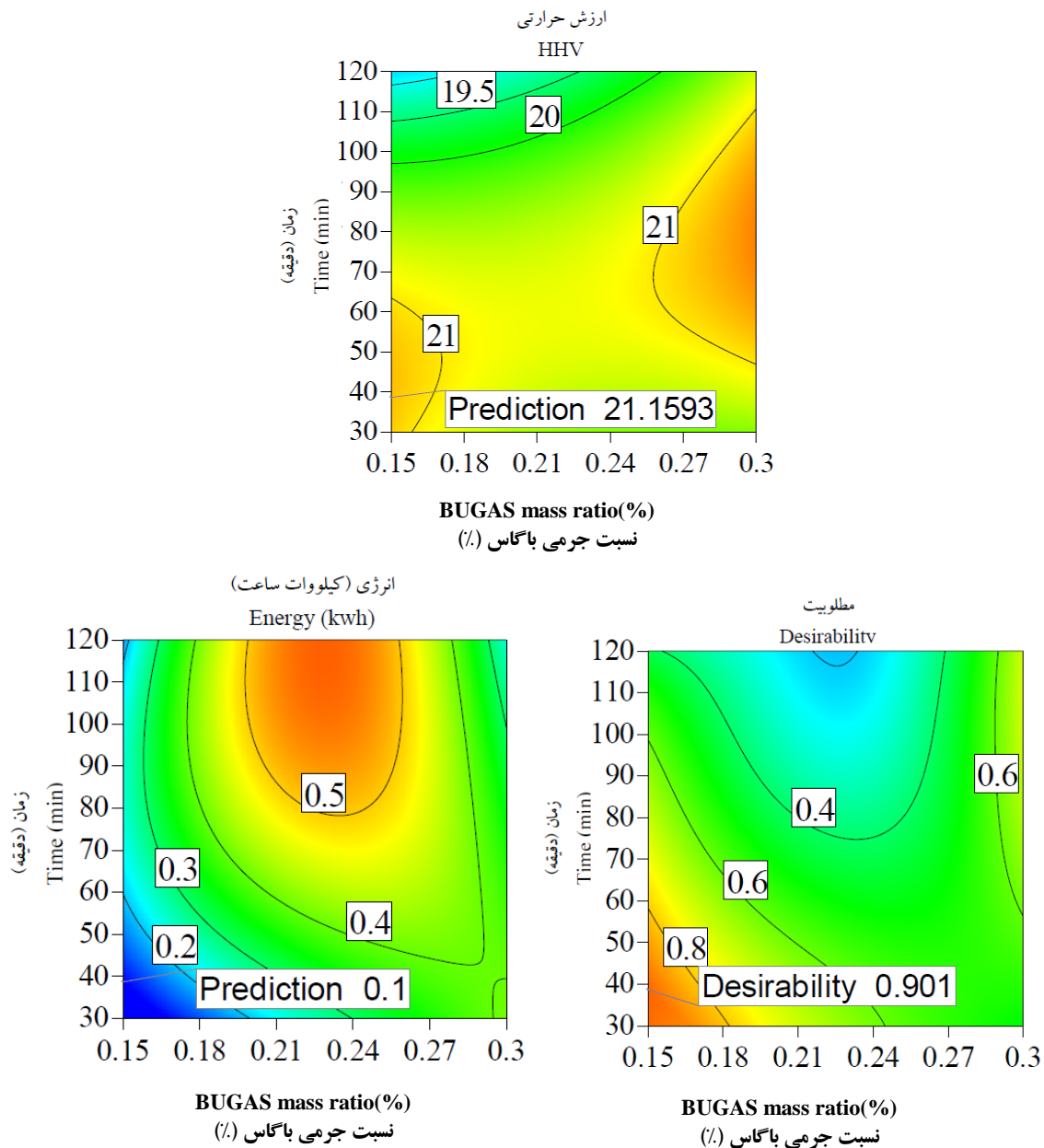


شکل (۳) نمودار دو بعدی (الف) و سه بعدی (ب) اثر فشار درون رآکتور، میزان نسبت باگاس به آب و زمان ماند مواد

بر میزان مصرف انرژی فرآیند پیرولیز

Figure (3) 2D (a) and 3D (b) representation of the effect of pressure, the ratio of BAGASSE and the residence time on the energy consumption

نوروزی و همکاران: بهینه سازی فرآیند پیرولیز سریع...



شکل (۴) میزان تابع مطلوبیت برای پارامترهای زمان ماند، فشار و میزان نسبت باگاس به آب نمونه‌ها

Figure (4) the desirability values for residence time, the pressure and the ratio between bagasse and water

بیشترین تابع مطلوبیت برای این نقطه ۹۰ درصد به دست آمد که میزان بالایی دارد و نشان می‌دهد روش سطح پاسخ توانسته است به طور موفقیت آمیزی مدل سازی داده‌های تجربی را انجام دهد.

### نتیجه گیری

از میان فرآیندهای مختلف تولید زغال زیستی فشرده، فرایند کربونیزه کردن هیدروترمال در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. عوامل بسیاری در این فرآیند می‌توانند اثرگذار باشند. در این تحقیق، فرآیند کربونیزه کردن هیدروترمال در سه سطح زمان ماند (۳۰، ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه)، ۳ سطح نسبت جرمی باگاس به آب (۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳) و سه سطح فشار درون رآکتور پیرولیز (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ بار) انجام شد. از روش سطح پاسخ به منظور یافتن نقطه بهینه عملکردی سامانه استفاده گردید.

بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، نسبت جرمی باگاس به آب معادل ۰/۱۵، زمان ۳۸ دقیقه و فشار ۱۱ bar به عنوان نقطه بهینه عملکردی سامانه پیرولیز انتخاب شدند. برای این نقطه بهینه، میزان ارزش حرارتی معادل ۲۱ MJ/kg و میزان انرژی برابر ۰/۰۹ kWh به دست آمد.

## References

1. Agrafioti, E., Bouras, G., Kalderis, D., and Diamadopoulos, E. 2013. Biochar Production by Sewage Sludge Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101: 72–78.
2. Ahmed, I., and Gupta, A.K. 2009. Syngas Yield during Pyrolysis and Steam Gasification of Paper. *Applied Energy*, 86(9): 1813–1821.
3. Ardebili, S.M.S., Solmaz, H., and Mostafaei, M. 2019. Optimization of Fusel Oil–Gasoline Blend Ratio to Enhance the Performance and Reduce Emissions. *Applied Thermal Engineering*, 148: 1334–1345.
4. Ashraf, A., Sattar, H., and Munir, S. 2019. Thermal Decomposition Study and Pyrolysis Kinetics of Coal and Agricultural Residues under Non-Isothermal Conditions. *Fuel*, 235: 504–514.
5. Baul, T.K., Alam, A., Strandman, H., and Kilpeläinen, A. 2017. Net Climate Impacts and Economic Profitability of Forest Biomass Production and Utilization in Fossil Fuel and Fossil-Based Material Substitution under Alternative Forest Management. *Biomass and Bioenergy*, 98: 291–305.
6. Biswas, B., Pandey, N., Bisht, Y., Singh, R., Kumar, J., and Bhaskar, T. 2017. Pyrolysis of Agricultural Biomass Residues: Comparative Study of Corn Cob, Wheat Straw, Rice Straw and Rice Husk. *Bioresource Technology*, 237: 57–63.
7. Chiodo, V., Zafarana, G., Maisano, S., Freni, S., and Urbani, F. 2016. Pyrolysis of Different Biomass: Direct Comparison among *Posidonia Oceanica*, Lacustrine Alga and White-Pine. *Fuel*, 164: 220–227.
8. Dabros, T.M.H., Stummann, M.Z., Høj, M., Jensen, P.A., Grunwaldt, J.D., and Gabrielsen, J. 2018. Transportation Fuels from Biomass Fast Pyrolysis, Catalytic Hydrodeoxygenation and Catalytic Fast Hydropyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 68: 268–309.
9. Duku, M.H., Gu, S., and Hagan, E.B. 2011. Biochar Production Potential in Ghana—a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): 3539–3551.
10. Gao, Z., Li, N., Yin, S., and Yi, W. 2019. Pyrolysis Behavior of Cellulose in a Fixed Bed Reactor: Residue Evolution and Effects of Parameters on Products Distribution and Bio-Oil Composition. *Energy*, 175: 1067–1074.
11. Gómez, N., Banks, S.W., Nowakowski, D.J., Rosas, J.G., Cara, J., and Sánchez M.E. 2018. Effect of Temperature on Product Performance of a High Ash Biomass during Fast Pyrolysis and Its Bio-Oil Storage Evaluation. *Fuel Processing Technology*, 172: 97–105.
12. Hoekman, S.K., Broch, A., Robbins, C., Zielinska, B., and Felix, L. 2013. Hydrothermal Carbonization (HTC) of Selected Woody and Herbaceous Biomass Feedstocks. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(2): 113–126.
13. Hu, S., Jess, A., and Xu, M. 2007. Kinetic Study of Chinese Biomass Slow Pyrolysis: Comparison of Different Kinetic Models. *Fuel*, 86(17–18): 2778–2788.
14. Kambo, H., and Dutta, A. 2015. A Comparative Review of Biochar and Hydrochar in Terms of Production, Physico-Chemical Properties and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45: 359–378.
15. Lehto, J., Oasmaa, A., Solantausta, Y., Kytö, M., and Chiaramonti, D. 2014. Review of Fuel Oil Quality and Combustion of Fast Pyrolysis Bio-Oils from Lignocellulosic Biomass. *Applied Energy*, 116: 178–190.
16. Meyer, P.A., Snowden-Swan, L.J., Jones, S.B., Rappe, K.G., and Hartley, D.S. 2020. The Effect of Feedstock Composition on Fast Pyrolysis and Upgrading to Transportation Fuels: Techno-Economic Analysis and Greenhouse Gas Life Cycle Analysis. *Fuel*, 259: 116218.

17. Nizamuddin, S., Baloch, H.A., Griffin, G.J., Mubarak, N.M., Bhutto, A.W., and Abro, R. 2017. An Overview of Effect of Process Parameters on Hydrothermal Carbonization of Biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73: 1289–1299.
18. Ouasfi, N., Bouzekri, S., Zbair, M., Ahsaine, H.A., Bakkas, S., and Bensitel M. 2019. Carbonaceous Material Prepared by Ultrasonic Assisted Pyrolysis from Algae (*Bifurcaria Bifurcata*): Response Surface Modeling of Aspirin Removal. *Surfaces and Interfaces*, 14: 61–71.
19. Pattiya, A., and Suttibak S. 2012. Production of Bio-Oil via Fast Pyrolysis of Agricultural Residues from Cassava Plantations in a Fluidised-Bed Reactor with a Hot Vapour Filtration Unit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95: 227–235.
20. Perkins, G., Bhaskar, T., and Konarova, M. 2018. Process Development Status of Fast Pyrolysis Technologies for the Manufacture of Renewable Transport Fuels from Biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90: 292–315.
21. Pour, A., Ardebili, S.M.S., and Sheikhdavoodi, M.J. 2018. Multi-Objective Optimization of Diesel Engine Performance and Emissions Fueled with Diesel-Biodiesel-Fusel Oil Blends Using Response Surface Method. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35): 35429–35439.
22. Román, S., Nabais, J.M.V., Laginhas, C., Ledesma, B., and González, J.F. 2012. Hydrothermal Carbonization as an Effective Way of Densifying the Energy Content of Biomass. *Fuel Processing Technology*, 103: 78–83.
23. Sahoo, B., Sahoo, N., and Saha, U. 2012. Effect of H<sub>2</sub>: CO Ratio in Syngas on the Performance of a Dual Fuel Diesel Engine Operation. *Applied Thermal Engineering*, 49: 139–146.
24. Sakthivel, R., Ramesh, K., Marshal, S.J., and Sadasivuni, K. 2019. Prediction of Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Waste Biomass Pyrolysis Oil Using Response Surface Methodology. *Renewable Energy*, 136: 91–103.
25. Sermyagina, E., Saari, J., Kaikko, J., and Vakkilainen, E. 2015. Hydrothermal Carbonization of Coniferous Biomass: Effect of Process Parameters on Mass and Energy Yields. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113: 551–556.
26. Sindhu, R., Binod, P., and Pandey, A. 2016. Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass—An Overview. *Bioresource Technology*, 199: 76–82.
27. Sutton, D., Kelleher, B., and Ross, J.R.H. 2001. Review of Literature on Catalysts for Biomass Gasification. *Fuel Processing Technology*, 73(3): 155–173.
28. Xiao, L-P., Shi, Z-J., Xu, F., Sun, R-C. 2012. Hydrothermal Carbonization of Lignocellulosic Biomass. *Bioresource Technology*, 118: 619–623.
29. Yaman, S. 2004. Pyrolysis of Biomass to Produce Fuels and Chemical Feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 45(5): 651–671.
30. Yanik, J., Kornmayer, C., Saglam, M., and Yüksel M. 2007. Fast Pyrolysis of Agricultural Wastes: Characterization of Pyrolysis Products. *Fuel Processing Technology*, 88(10): 942–947.
31. Zanzi, R., Sjöström, K., and Björnbom, E. 2002. Rapid Pyrolysis of Agricultural Residues at High Temperature. *Biomass and Bioenergy*, 23(5): 357–366.
32. Zhang, Q., Chang, J., and Wang, T.X.Y. 2007. Review of Biomass Pyrolysis Oil Properties and Upgrading Research. *Energy Conversion and Management*, 48(1): 87–92.