Optimasi pirolisis limbah kayu Durian (*Durio zibethinus*) berdasarkan ukuran partikel dan suhu

*The optimization of Durian (*Durio zibethinus*) wood waste pyrolysis based on particle size and temperature*

Evy Setiawati^{a,*}, Wahida Annisa Yusuf^b, Heri Soedarmanto^c

^a Balai Riset dan Standardisasi Industri Banjarbaru
Jl. Panglima Batur Barat No.2 Banjarbaru-Indonesia

^b Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa
Jl. Kebun Karet Loktabat Utara Banjarbaru-Indonesia

^c Politeknik Negeri Banjarmasin
Jl. Brigjen H. Hasan Basri Kayu Tangi Banjarmasin-Indonesia
*evy.kemenperin@gmail.com

Diterima 10 Juni 2021 Direvisi 24 November 2021 Disetujui 26 November 2021

ABSTRAK

Kualitas biochar dipengaruhi oleh cara pirolisis dan jenis bahan baku. Namun perlu diperhatikan bahwa karakteristik biochar sebagai amandemen tanah tergantung pada kondisi produksinya (suhu pirolisis) serta bahan baku awal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum kadar air, abu, zat mudah menguap dan karbon terikat biochar limbah kayu durian berdasarkan ukuran partikel bahan baku dan suhu pirolisis. Limbah kayu durian yang digunakan dalam penelitian ini berukuran 0,17–0,42 mm; 0,42–1,00 mm; dan 1,00–2,83 mm, dengan variasi suhu pirolisis 350, 450, 550 °C. Perlakuan diulang sebanyak tiga kali. Optimasi menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) dengan rancangan Desain Komposit Sentral (*Central Composite Design* (CCD)). Berdasarkan model *quadratic* pada persamaan matematika, didapatkan kadar air optimum biochar limbah kayu durian sebesar 3,83% dengan ukuran partikel bahan baku pada 1,78 mm dan suhu pirolisis 505,1 °C. Kadar zat mudah menguap optimum biochar sebesar 15,48% dengan ukuran partikel bahan baku 0,82 mm dan suhu pirolisis 542,2 °C. Kadar abu optimum biochar sebesar 2,14% dengan ukuran partikel bahan baku 2,91 mm dan suhu pirolisis 519,5 °C. Kadar karbon terikat optimum biochar sebesar 77,84% dengan ukuran partikel bahan baku 1,44 mm dan suhu pirolisis 549,5 °C.

Kata Kunci : kondisi optimum; metode permukaan respon; limbah kayu durian; biochar

ABSTRACT

The quality of biochar is influenced by the pyrolysis method and the type of raw material. However, it should be noted that the characteristics of biochar as a soil amendment depend on the production conditions (pyrolysis temperature) and the initial raw materials. This study was aimed to determine the optimum conditions for moisture content, ash content, volatile matter, and fixed carbon of durian wood waste biochar based on the particle size of raw materials and pyrolysis temperature. The size of durian wood waste used in this study was 0.17–0.42 mm; 0.42–1.00 mm; and 1.00–2.83 mm. The variation in pyrolysis temperature was 350, 450, 550 °C. The treatment was repeated for three times. Optimization used the Response Surface Methodology (RSM) method with a Central Composite Design (CCD) design. Based on the quadratic model on mathematical equations, the optimum moisture content of durian wood waste biochar was 3.83% with 1.78 mm of raw material particle size and 505.1 °C of pyrolysis temperature. The optimum volatile matter of durian wood waste biochar was 15.48% with 0.82 mm of raw material particle size of and 542.2 °C of pyrolysis temperature. The optimum ash content of durian wood waste biochar was 2.14% with 2.91 mm of particle size and 519.5

°C of pyrolysis temperature. Optimum fixed carbon biochar was 77.84% with 1.44 mm of raw material particle size of and 549.5 °C of pyrolysis temperature.

Keywords : *optimum condition; response surface methodology; durian wastewood; biochar*

I. PENDAHULUAN

Limbah kayu durian (*Durio zibethinus*) berpotensi untuk diolah sebagai biochar (Chowdhury *et al.*, 2016; Setiawati, Prijono, Mardiana, Prayogo *et al.*, 2019). Biochar adalah bahan yang kaya karbon yang berasal dari dekomposisi termokimia biomassa lignoselulosa dengan oksigen yang terbatas atau tidak ada. Dibandingkan dengan jenis bahan berkarbon lainnya, biochar merupakan bahan karbon baru yang hemat biaya dan ramah lingkungan dengan potensi aplikasi yang besar di berbagai bidang. Telah berkembang berbagai penelitian tentang pemanfaatan biochar dalam berbagai bidang aplikasi lanjutan, seperti *fuel cell carbon* (Huggins *et al.*, 2015; Jafri *et al.*, 2018), penyimpanan energi (Cheng *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017) dan katalisis (Xiong *et al.*, 2017; F. Cheng & Li, 2018), sebagai adsorben dan agen amandemen tanah untuk mempromosikan penyerapan karbon (Setiawati, Prijono, Mardiana, Annisa *et al.*, 2019) serta menurunkan emisi rumah kaca (Setiawati, Prijono, Mardiana, & Soemarno, 2019). Aplikasi biochar bertujuan untuk meningkatkan hasil panen jagung. Biochar sebesar 1 mg/ha-40 mg/ha mampu meningkatkan hasil jagung sebesar 20%-50% (Glaser *et al.*, 2015; Kammann *et al.*, 2017). Biochar sebagai bahan ramah lingkungan pada umumnya dihasilkan dari limbah organik seperti limbah pertanian, residu kehutanan, dan limbah kota. Pemanfaatan biochar telah menarik perhatian masyarakat, dibuktikan dengan peningkatan penggunaannya dalam berbagai aplikasi lingkungan. Limbah organik dapat diubah menjadi arang dengan berbagai macam teknik seperti pirolisis, hidrotermal karbonisasi (HTC), gasifikasi, dan *torrefaction*. Metode karbonisasi konvensional untuk menghasilkan biochar adalah pirolisis (Enaime *et al.*, 2020). Kualitas biochar dipengaruhi oleh cara pembakaran

(reaktor, suhu, metode) dan jenis bahan baku (Lehmann & Joseph, 2009). Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa kualitas biochar tidak hanya ditentukan oleh metode pirolisis, tetapi juga suhu pirolisis yang sangat mempengaruhi karakter sifat kimia, fisik, dan biologi (Chan & Xu, 2009). Menurut Demirbas (2004), jika tujuan pirolisis adalah untuk memaksimalkan produksi cairan dan arang yang dihasilkan dari suatu biomassa, diperlukan kondisi suhu pirolisis rendah (<177°C). Akan tetapi, perlu diperhatikan bahwa karakteristik biochar sebagai amandemen tanah tergantung pada kondisi produksinya (suhu), serta profil unsur hara dari bahan baku awal. Temperatur tinggi (> 500°C) menghasilkan bentuk karbon yang lebih aromatik bila dibandingkan dengan temperatur rendah. Demikian pula, bahan baku dengan lignin tinggi (seperti kayu) umumnya dihasilkan rendemen biochar yang lebih besar, sedangkan bahan baku dengan hemiselulosa dan selulosa tinggi (seperti rumput gajah) umumnya menghasilkan lebih banyak zat volatil. Konduktivitas listrik yang lebih besar (EC) dan pH yang lebih tinggi juga diamati ketika terurai secara termokimia pada suhu yang lebih tinggi (> 350°C) (Keech *et al.*, 2005).

Ukuran partikel biomassa merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap kualitas biochar, namun kurang mendapat perhatian penelitian. Ukuran partikel dapat mempengaruhi interaksi antara tanah dan biochar, karena partikel biochar yang lebih kecil akan memiliki kontak fisik yang lebih besar dengan partikel tanah (Sigua *et al.*, 2014). Biochar yang memiliki ukuran partikel lebih kecil berpotensi memiliki nilai pH yang lebih tinggi dan mampu menghasilkan kesetimbangan pH campuran tanah-biochar yang lebih cepat (Gezahegn *et al.*, 2019). Biochar yang berasal dari bahan baku berpartikel lebih kecil umumnya juga memiliki kandungan abu yang lebih tinggi,

sehingga dapat meningkatkan efek pengapuran (Chen *et al.*, 2017), meningkatkan hara dan penyerapan senyawa organik (Xie *et al.*, 2015). Secara keseluruhan, diperlukan penelitian lanjutan untuk menyesuaikan kondisi biomassa (bahan baku) dan kondisi pirolisis supaya dapat mengoptimalkan produksi biochar (Spokas *et al.*, 2012). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kondisi optimum kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap, dan kadar karbon terikat biochar limbah kayu durian berdasarkan ukuran partikel bahan baku dan suhu pirolisis.

II. BAHAN DAN METODE

II.1. Persiapan bahan baku

Limbah kayu durian yang digunakan untuk penelitian ini dikumpulkan dari industri penggergajian kayu di wilayah Banjarbaru Kalimantan Selatan. Limbah kayu durian terlebih dahulu diolah menjadi ukuran yang lebih kecil menggunakan mesin penggiling lalu diayak menjadi 3 (tiga) jenis ukuran partikel, yaitu ukuran halus 0,17–0,42 mm; ukuran sedang 0,42–1,00 mm; dan ukuran kasar 1,00–2,83 mm. Bahan baku serbuk kayu durian dalam penelitian ini menggunakan variasi ukuran partikel dan suhu pirolisis: ukuran serbuk 0,17–0,42 mm dengan suhu pirolisis 350 °C (BCH350), suhu pirolisis 450 °C (BCH450), dan suhu pirolisis 550 °C (BCH550); ukuran serbuk 0,42–1,00 mm dengan suhu pirolisis 350 °C (BCS350), suhu pirolisis 450 °C (BCS450), dan suhu pirolisis 550 °C (BCS550); ukuran serbuk 1,00–2,83 mm dengan suhu pirolisis 350 °C (BCK350), suhu pirolisis 450 °C (BCK450), dan suhu pirolisis 550 °C (BCK550).

II.2. Pirolisis Bahan Baku

Sebanyak 1.500 g bahan baku dari setiap ukuran partikel dimasukkan dalam reaktor pirolisis. Reaktor berbentuk silinder, berbahan stainless steel dilapisi *castable* C-16 tebal 4 cm, tersambung dengan *cyclone separator* berbahan *stainless steel* dan *liquid smoke condenser* model shell dan tube bahan *carbon steel*, tube GIP ¾" lengkap dengan *nozzle*. Peralatan penunjang terdiri dari temperatur *control panel* dan *water cooler* yang dilengkapi dengan pompa sirkulasi. Reaktor dipanaskan terlebih dahulu hingga mencapai suhu yang diinginkan, yaitu 350, 450, 550 °C selama 2 (dua) jam. Arang yang dihasilkan diuji kadar air, kadar abu, kadar zat mudah terbang, dan kadar karbon terikat berdasarkan SNI 06-4369-1996.

II.3. Metode analisis data dan rancangan percobaan

Analisis statistik tahap ini menggunakan model RAL (Rancangan Acak Lengkap) Faktorial dengan 2 faktorial, masing-masing terdiri dari 3 taraf. Perlakuan diulang sebanyak tiga kali. Optimasi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM). Metodologi respon permukaan menggunakan model matematis polinomial orde satu atau orde dua. Persamaan umum untuk model matematis polinomial orde dua adalah:

$$\beta_0 = \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_j x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Kondisi optimum didapat dari turunan pertama dari model matematis yang didapat, dengan prasyarat turunan model matematis sama dengan nol (Oramahi & Diba, 2013). RSM ini menggunakan Desain Komposit Sentral (*Central Composite Design* (CCD) sebagai berikut:

Tabel 1. Desain komposit sentral faktor dan taraf

Faktor	-1	0	1
Ukuran partikel serbuk kayu (mm)	0,170-0,142	0,142-1,000	1,000-2,830
Suhu pirolisis (°C)	350	450	550

Keterangan: -1: nilai terendah, 0: nilai tengah/medium, 1: Nilai tertinggi

Prediksi kondisi optimum suhu pirolisis dan ukuran partikel didapatkan dari hasil interpolasi persamaan *respon surface methodology* menggunakan persamaan:

$$y = y_1 + \frac{(x-x_1)}{(x_2-x_1)}(y_2-y_1) \quad (2)$$

Optimasi RSM dianalisis menggunakan *software design expert 7.1.6* untuk regresi polinomial dan untuk menggambarkan bentuk 3 dimensinya. Faktor/variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah kadar proksimat biochar, terdiri dari kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap (VM), dan kadar karbon terikat (FC).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik biochar limbah kayu durian

Hasil analisis proksimat biochar kayu durian berdasarkan variasi ukuran partikel dan suhu. Pirolisis tercantum pada Tabel 2 yang menunjukkan kadar air dan kadar zat mudah menguap biochar menurun seiring dengan peningkatan suhu pirolisis dan ukuran partikel bahan baku, sebaliknya untuk kadar abu dan kadar karbon terikat. Kadar air sampel biochar menurun dengan meningkatnya suhu pirolisis. Pada penelitian ini, semua kadar air biochar kurang dari 10% (4,24-6,77) %. Rendahnya kadar air berguna untuk memperpanjang masa simpan biochar. Hasil ini konsisten dengan yang diperoleh oleh Chowdhury *et al.* (2016) yang menyatakan kadar air biochar limbah kayu sebesar (1,57-4,58)% pada suhu pirolisis dari 350°C menjadi 550°C.

Zat yang mudah menguap pada biochar menurun seiring dengan kenaikan suhu pirolisis. Zat yang mudah menguap telah hilang selama dekomposisi hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Reaksi sekunder senyawa volatil lebih sering terjadi seiring dengan kenaikan suhu pirolisis sehingga dihasilkan gas yang tinggi (Hernandez-Mena *et al.*, 2014). Oleh karena zat yang mudah menguap telah hilang, maka kadar karbon terikat meningkat. Temperatur proses yang tinggi (550 °C) menyebabkan kerusakan selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Cybulak *et al.*, 2021). Akibatnya, kandungan Kadar zat mudah menguap menurun tajam, tetapi kadar abunya meningkat. Hal ini sejalan dengan penelitian Haji *et al.* (2015), yang menyatakan bahwa kadar zat mudah menguap biochar hasil pirolisis pada suhu 400 °C dan 500 °C mampu memenuhi standar yang ditetapkan dengan jumlah maksimum 30%, kecuali hasil pirolisis biochar yang diproses pada suhu 300 °C.

Hal ini disebabkan tidak sempurnanya proses pirolisis. Kadar abu menurun seiring dengan peningkatan ukuran partikel bahan baku, yaitu ukuran serbuk 0,17–0,420; 0,42–1,00; dan 1,00–2,83 mm pada suhu pirolisis 350 °C berturut-turut sebesar 1,76%; 1,15%; dan 1,04%, pada suhu pirolisis 450 °C

Hal ini disebabkan tidak sempurnanya proses pirolisis. Kadar abu menurun seiring dengan peningkatan ukuran partikel bahan baku, yaitu ukuran serbuk 0,17–0,420; 0,42–1,00; dan 1,00–2,83 mm pada suhu pirolisis 350 °C berturut-turut sebesar 1,76%; 1,15%; dan 1,04%, pada suhu pirolisis 450 °C

Tabel 2. Analisis Proksimat-Ultimat Biochar Kayu Durian

Kode	Analisis proksimat (%)			
	Kadar air	Kadar zat mudah menguap	Kadar abu	Kadar karbon terikat
BCH350	6,77	64,47	1,76	27,00
BCH450	4,56	26,37	3,43	65,64
BCH550	5,44	16,41	4,27	73,88
BCS350	5,04	56,69	1,15	37,12
BCS450	4,24	24,73	2,28	68,75
BCS550	4,28	16,44	2,51	76,77
BCK350	5,50	53,25	1,04	40,21
BCK450	4,74	25,64	1,86	67,76
BCK550	3,76	16,73	2,24	77,27

berturut-turut sebesar 3,43%; 2,28%; dan 1,86%, pada suhu pirolisis 550 °C berturut-turut sebesar 4,27%; 2,51%; dan 2,24%. Kadar abu berkorelasi negatif terhadap ukuran partikel. Tingginya kadar abu pada ukuran

partikel terkecil dapat mencapai sekitar empat kali lebih tinggi dari ukuran partikel terbesar (Zaman *et al.*, 2018), atau partikel yang lebih halus (<0.18 mm) lebih tinggi sepuluh kali lipat daripada ukuran partikel yang lebih besar (> 0.84 mm) (Tamaki & Mazza, 2010). Di sisi lain, kadar abu meningkat seiring dengan peningkatan suhu pirolisis. Sejalan dengan penelitian Reyhanitabar *et al.*, (2020), hal ini dikarenakan konsentrasi bahan mineral meningkat secara bertahap seiring dengan peningkatan suhu pirolisis.

Kadar karbon terikat yang tinggi menandakan bahwa biochar memiliki kapasitas panas yang tinggi (Muhammad *et al.*, 2013). Bahan baku berukuran kecil mempengaruhi kandungan kadar karbon terikat biochar. Sejalan dengan hasil penelitian Tran *et al.* (2017), kadar karbon terikat biochar meningkat seiring peningkatan ukuran partikel bahan baku. Biochar dengan ukuran partikel paling besar, yaitu 1,00–2,83 mm pada suhu

pirolisis 550 °C memiliki kadar karbon terikat tertinggi dengan nilai 77,27%. Hal ini dikarenakan adanya pembentukan karbon sekunder dari gas pirolisis melalui peningkatan ukuran partikel dari bahan baku, akibat dari adanya efek pemecahan katalitik dari arang yang terbentuk pada gas pirolisis yang baru terbentuk (Ridhuan *et al.*, 2019). Berdasarkan data, kandungan kadar karbon terikat biochar juga berkorelasi positif dengan peningkatan suhu pirolisis (Abdullah *et al.*, 2016).

3.2. Optimasi Proses Produksi Biochar Limbah Kayu Durian

Optimasi respon kadar air, kadar abu, VM, dan FC terhadap variasi ukuran partikel dan suhu pirolisis diuji menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) menggunakan desain komposit sentral (*Central Composite Design*, CCD). Persamaan respon *surface* dan prediksi kondisi optimum suhu pirolisis dan ukuran partikel model kuadratik disajikan pada Tabel 3. Adapun pengaruh interaksi respon variabel uji terhadap ukuran partikel bahan baku dan suhu pirolisis beserta level *isoquant* disajikan pada Gambar 1.

Tabel 3. *Respon Surface* Pengaruh Ukuran Partikel dan Suhu Pirolisis

z	Persamaan ukuran partikel serbuk kayu dan suhu pirolisis terhadap karakter biochar	R ²	Optimum		
			x	y	z
Kadar air (%)	$z = 4,108 + 0,608 x^2 + 0,618 y^2 - 0,462 x - 0,638 y - 0,102 xy$	0,821 ^{ns}	1,78	505,1	3,833
VM (%)	$z = 24,785 + 1,192 x^2 + 11,752 y^2 - 1,938 x - 20,805 y + 2,885 xy$	0,997 ^s	0,82	542,2	15,484
Kadar abu (%)	$z = 2,221 + 0,453 x^2 - 0,362 y^2 - 0,720 x + 0,845 y - 0,327 xy$	0,988 ^s	2,91	519,5	2,138
FC (%)	$z = 68,885 - 2,253 x^2 - 12,008 y^2 + 3,120 x + 20,598 y - 2,455 xy$	0,995 ^s	1,44	549,5	77,840

Keterangan: x=ukuran partikel (mm), y=suhu pirolisis (°C), z=karakteristik biochar, ns = tidak signifikan, s = signifikan

Gambar 1. Kurva Pengaruh Respon Suhu Pirolisis dan Ukuran Partikel terhadap (a) Kadar Air; (b) Kadar zat mudah menguap; (c) Kadar Abu; (d) Kadar karbon terikat

Berdasarkan Gambar 1 dan Tabel 1, tampak bahwa kadar air optimum biochar yaitu sebesar 3,83% dengan ukuran partikel optimum limbah kayu durian pada 1,78 mm dan suhu pirolisis 505,1 °C. Kadar zat mudah menguap optimum biochar limbah kayu durian yaitu sebesar 15,48% dengan ukuran partikel limbah kayu pada 0,82 mm dan suhu pirolisis 542,2 °C. Kadar abu optimum biochar limbah kayu durian yaitu sebesar 2,14% dengan ukuran partikel limbah kayu pada 2,91 mm dan suhu pirolisis 519,5 °C. Kadar karbon terikat optimum biochar yaitu sebesar 77,84% dengan ukuran partikel limbah kayu durian pada 1,44 mm dan suhu pirolisis 549,5 °C.

3.2.1. Kadar air

Hasil analisis ragam (ANOVA) respon kadar air berdasarkan *Design Expert 7.1.6* ditampilkan pada Tabel 4.

Pada Tabel 4 terlihat bahwa p-value >0,05, yang berarti ukuran partikel dan suhu pirolisis tidak berpengaruh signifikan terhadap kadar air. Kadar air biochar yang dihasilkan telah sesuai dengan syarat mutu SNI 06-4369-1996, yaitu maksimal 6%. Perbedaan suhu pirolisis dan ukuran partikel tidak menyebabkan perbedaan yang signifikan. Hal tersebut disebabkan karena kadar air kurang berpengaruh signifikan terhadap struktur mikroskopis arang kayu. Reaksi dekomposisi saat pirolisis menyebabkan adanya penghilangan kelembaban tidak sempurna (Burhenne *et al.*, 2013).

Tabel 4. Hasil Analisis Ragam Respon Kadar Air

Sumber	Jumlah Kuadrat	df	Kuadrat Rata-Rata	Nilai F	Nilai p	Keterangan
Model	5,27	5	1,05	2,74	0,218	Tidak signifikan
A-ukuran partikel	1,28	1	1,28	3,33	0,166	
B-suhu pirolisis	2,44	1	2,44	6,36	0,086	
AB	0,042	1	0,042	0,109	0,763	
A ²	0,740	1	0,740	1,93	0,259	
B ²	0,765	1	0,765	1,99	0,253	
Residual	1,15	3	0,384			
Cor Total	6,42	8				

Tabel 5. Hasil Analisis Ragam Respon Kadar Zat Mudah Menguap

Sumber	Jumlah Kuadrat	df	Kuadrat Rata-Rata	Nilai F	Nilai p	Keterangan
Model	2931,97	5	2931,97	199,45	0,0006	signifikan
A-ukuran partikel	22,54	1	22,54	7,67	0,0696	
B-suhu pirolisis	2597,09	1	2597,09	883,34	<0,0001	
AB	33,29	1	33,29	11,32	0,0436	
A ²	2,84	1	2,84	0,9660	0,3982	
B ²	276,20	1	276,20	93,94	0,0023	
Residual	8,82	3	2,94			
Cor Total	2940,79	8586,39				

3.2.2. Kadar zat mudah menguap

Hasil analisis ragam (ANOVA) respon ukuran partikel dan suhu pirolisis terhadap zat mudah menguap biochar ditampilkan pada Tabel 5.

Pada Tabel 5 terlihat bahwa nilai $p < 0,05$, yang berarti suhu pirolisis dan interaksi antara ukuran partikel-suhu pirolisis berpengaruh signifikan terhadap kadar zat mudah menguap. Sejalan dengan Chouchene *et al.* (2010) yang menyatakan bahwa bahwa ukuran partikel dan suhu pirolisis memiliki efek yang signifikan pada degradasi thermal limbah padat zaitun menggunakan penganalisis termogravimetri. Ukuran partikel bahan baku yang lebih kecil dan suhu pirolisis menunjukkan tingkat kehilangan massa dan melepaskan sejumlah besar kadar zat mudah menguap (Zaman *et al.*, 2018).

3.2.3. Kadar abu

Hasil analisis ragam (ANOVA) respon ukuran partikel dan suhu pirolisis terhadap kadar abu biochar ditampilkan pada Tabel 6.

Pada Tabel 6 terlihat bahwa nilai $p < 0,05$, yang berarti ukuran partikel dan suhu pirolisis, dan interaksinya berpengaruh signifikan terhadap kadar abu. Zaman *et al.* (2018) juga menyebutkan bahwa kadar abu terbukti berkorelasi dengan ukuran partikel bahan baku. Ukuran partikel bahan baku berpengaruh signifikan terhadap kadar abu biochar yang dihasilkan. Kadar abu tertinggi dihasilkan pada ukuran partikel terkecil. Hal ini dimungkinkan adanya unsur kalium yang terkonsentrasi dalam partikel yang lebih ringan sehingga berkontribusi besar pada unsur pembentuk abu (Lacey *et al.*, 2015). Rafiq *et al.* (2016) melaporkan bahwa peningkatan suhu pirolisis mampu menyebabkan peningkatan kadar abu sebesar 5,70-18,70%, hal ini dikarenakan adanya peningkatan secara bertahap bahan anorganik dan residu pembakaran bahan organik dalam bahan baku (Zhao *et al.*, 2017).

Tabel 6. Hasil Analisis Ragam Respon Kadar Abu

Sumber	Jumlah Kuadrat	df	Kuadrat Rata-Rata	Nilai F	Nilai p	Keterangan
Model	8,50	5	8,50	49,90	0,0043	signifikan
A-ukuran partikel	3,11	1	3,11	91,35	0,0024	
B-suhu pirolisis	4,28	1	4,28	125,82	0,0015	
AB	0,429	1	0,429	12,60	0,0381	
A ²	0,411	1	0,411	12,07	0,0402	
B ²	0,262	1	0,262	7,68	0,0695	
Residual	0,102	3	0,0341			
Cor Total	8,60	8				

Tabel 7. Hasil Analisis Ragam Respon Kadar Karbon Terikat

Sumber	Jumlah Kuadrat	df	Kuadrat Rata-Rata	Nilai F	Nilai p	Keterangan
Model	2926,82	5	2926,82	120,56	0,0012	signifikan
A-ukuran partikel	58,41	1	58,41	12,03	0,0404	
B-suhu pirolisis	2545,75	1	2545,75	524,31	0,0002	
AB	24,11	1	24,11	4,97	0,1122	
A ²	10,16	1	10,16	2,09	0,2439	
B ²	288,40	1	288,40	59,40	0,0045	
Residual	14,57	3	4,86			
Cor Total	2941,38	8				

3.2.4. Kadar karbon terikat

Hasil analisis ragam (ANOVA) respon ukuran partikel dan suhu pirolisis terhadap kadar karbon terikat biochar ditampilkan pada Tabel 7.

Pada Tabel 7 terlihat bahwa nilai $p < 0,05$, yang berarti ukuran partikel dan suhu pirolisis, berpengaruh signifikan terhadap kadar karbon terikat. Suhu pirolisis memiliki pengaruh yang lebih besar pada kadar karbon terikat dikarenakan adanya reaksi devolatilisasi saat proses pirolisis mampu menghasilkan lebih banyak karbon (Angin & Şensöz, 2014; Mohd Hasan *et al.*, 2019). Pada penelitian ini, kadar karbon terikat meningkat tajam seiring dengan peningkatan suhu pirolisis, dengan kadar optimum kadar karbon terikat limbah kayu durian pada suhu pirolisis 549,5 °C. Hong *et al.* (2020), menyatakan bahwa kandungan kadar karbon terikat dalam biochar residu pertanian meningkat dengan cepat dari 300 °C ke 500 °C.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis data dengan metode *response surface methodology*, maka didapatkan kondisi optimum proses produksi biochar berbahan baku limbah kayu durian yaitu sebagai berikut: kadar air optimum biochar sebesar 3,83% dengan ukuran partikel optimum bahan baku pada 1,78 mm dan suhu pirolisis 505,1 °C. Kadar zat mudah menguap optimum biochar sebesar 15,48% dengan ukuran partikel bahan baku pada 0,82 mm dan suhu pirolisis 542,2 °C. Kadar abu optimum biochar sebesar 2,14% dengan ukuran partikel bahan baku pada 2,91 mm dan suhu pirolisis 519,5 °C. Kadar karbon terikat optimum biochar yaitu sebesar 77,84% dengan ukuran partikel bahan baku pada 1,44 mm dan suhu pirolisis 549,5 °C.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih atas semua pihak yang terlibat dalam kegiatan penelitian dan penyusunan artikel ini. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan, Kementerian Keuangan yang telah memberikan dana bantuan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H., Jie, W. S., Yusof, N., & Isa, I. M. (2016). Fuel and ash properties of biochar produced from microwave-assisted carbonisation of oil palm trunk core. *Journal of Oil Palm Research*, 28(1), 81–92. <https://doi.org/10.21894/jopr.2016.2801.10>
- Angin, D., & Şensöz, S. (2014). Effect of pyrolysis temperature on chemical and surface properties of biochar of rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 16(7–8), 684–693. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.856842>
- Burhenne, L., Damiani, M., Aicher, T. (2013). Effect of feedstock water content and pyrolysis temperature on the structure and reactivity of spruce wood char produced in fixed bed pyrolysis. *Fuel*, 107:836–847
- Chan, K. Y., & Xu, Z. (2009). Biochar: Nutrient properties and their enhancement. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (pp. 67–84). Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849770552>
- Chen, J., Li, S., Liang, C., Xu, Q., Li, Y., Qin, H., & Fuhrmann, J. J. (2017). Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: Effect of particle size and addition rate. *Science of the Total Environment*, 574, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.190>
- Cheng, B. H., Zeng, R. J., & Jiang, H. (2017). Recent developments of post-modification of biochar for electrochemical energy storage. *Bioresource Technology*, 246, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.060>
- Cheng, F., & Li, X. (2018). Preparation and application of biochar-based catalysts for biofuel production. *Catalysts*, 8(9), 1–35. <https://doi.org/10.3390/catal8090346>
- Chouchene, A., Jeguirim, M., Khiari, B., Zagrouba, F., & Trouvé, G. (2010). Thermal degradation of olive solid waste: Influence of particle size and oxygen concentration. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(5), 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.010>
- Chowdhury, Z. Z., Ziaul Karim, M., Ashraf, M. A., & Khalid, K. (2016). Influence of carbonization temperature on physicochemical properties of biochar derived from slow pyrolysis of durian wood (*Durio zibethinus*) sawdust. *BioResources*, 11(2), 3356–3372. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3356-3372>
- Cybulak, M., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2021). The influence of biochar on the content of carbon and the chemical transformations of fallow and grassland humic acids. *Scientific Reports*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85239-w>
- Demirbas, A. (2004). Effects of temperature and particle size on biochar yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>
- Enaime, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lübken, M. (2020). Biochar for wastewater treatment-conversion technologies and applications. *Applied Sciences*, 10, 2 of 29. <https://doi.org/10.3390/app10103492>

- Gezahegn, S., Sain, M., & Thomas, S. C. (2019). Variation in feedstock wood chemistry strongly influences biochar liming potential. *Soil Systems*, 3(2), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems3020026>
- Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H. P., & Gerber, H. (2015). Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 667–678.
<https://doi.org/10.1007/s13593-014-0251-4>
- Haji, A. G., Khaldun, I. B., Habibati, Nazar, M., dan Safrina E. (2015). Pyrolysis Temperature effect to the biochar product from chocolate's fruit skin (*Theobroma cacao* L.), Proceedings of The 5th Annual International Conference Syiah Kuala University (AIC Unsyiah) In conjunction with The 8th International Conference of Chemical Engineering on Science and Applications (ChESA), Banda Aceh, Indonesia Hernandez-Mena, L. E., Pecora, A. A. B., & Beraldo, A. L. (2014). Slow pyrolysis of bamboo biomass: Analysis of biochar properties. *Chemical Engineering Transactions*, 37, 115–120.
<https://doi.org/10.3303/CET1437020>
- Hong, Z., Zhong, F., Niu, W., Zhang, K., Su, J., Liu, J., Li, L., & Wu, F. (2020). Effects of temperature and particle size on the compositions, energy conversions and structural characteristics of pyrolysis products from different crop residues. *Energy*, 190, 116413.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116413>
- Huggins, T. M., Pietron, J. J., Wang, H., Ren, Z. J., & Biffinger, J. C. (2015). Graphitic biochar as a cathode electrocatalyst support for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 195, 147–153.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.012>
- Jafri, N., Wong, W. Y., Doshi, V., Yoon, L. W., & Cheah, K. H. (2018). A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 152–166.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.036>
- Kammann, C., Ippolito, J., Hagemann, N., Borchard, N., Cayuela, M. L., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Jeffery, S., Kern, J., Novak, J., Rasse, D., Saarnio, S., Schmidt, H. P., Spokas, K., & Wrage-Mönnig, N. (2017). Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden—knowns, unknowns and future research needs. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(2), 114–139.
<https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1319375>
- Keech, O., Carcaillet, C., & Nilsson, M. C. (2005). Adsorption of allelopathic compounds by wood-derived charcoal: The role of wood porosity. *Plant and Soil*, 272(1–2), 291–300.
<https://doi.org/10.1007/s11104-004-5485-5>
- Lacey, J. A., Aston, J. E., Westover, T. L., Cherry, R. S., & Thompson, D. N. (2015). Removal of introduced inorganic content from chipped forest residues via air classification. *Fuel*, 160, 265–273.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.100>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management*.
- Mohd Hasan, M. H., Bachmann, R. T., Loh, S. K., Manroshan, S., & Ong, S. K. (2019). Effect of pyrolysis temperature and time on properties of palm kernel shell-based biochar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 548.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/548/1/012020>
- Muhammad, D. R. A., Parnanto, N. H. R., Widadie, F. (2013). Kajian peningkatan mutu briket arang tempurung kelapa dengan alat pengering tipe rak berbahan bakar

- biomassa, *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, VI (1), 23-26 Oramahi, H. A., & Diba, F. (2013). Maximizing the production of liquid smoke from bark of durio by studying its potential compounds. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.012>
- Rafiq, M. K., Bachmann, R. T., Rafiq, M. T., Shang, Z., Joseph, S., & Long, R. L. (2016). Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (zea mays l.) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance. *PLoS ONE*, 11(6), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156894>
- Reyhanitabar, A., Farhadi, E., Ramezanzadeh, H., & Oustan, S. (2020). Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(2), 547–561.
- Ridhuan, K., Irawan, D., Inthifawzi, R. (2019). Proses pembakaran pirolisis dengan jenis biomassa dan karakteristik asap cair yang dihasilkan. *TURBO*, 8(1):69-78
- Setiawati, E., Prijono, S., Mardiana, D., Annisa, W., & . S. (2019). Effects of durian wood waste biochar on acid sulphate soil properties and rice yield in Indonesia. *Journal of Agronomy*, 18(2), 71–79. <https://doi.org/10.3923/ja.2019.71.79>
- Setiawati, E., Prijono, S., Mardiana, D., Prayogo, C., & Soemarno. (2019). Impact of pyrolysis temperature and water quenching on hydrophilicity of biochar derived from durian wood waste. *Bioscience Research*, 16(2), 2047–2062.
- Setiawati, E., Prijono, S., Mardiana, D., & Soemarno, S. (2019). Pengaruh biochar serbuk kayu durian terhadap karakteristik tanah sulfat masam dalam mengurangi emisi gas metana. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 6(2), 1251–1260. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2019.006.2.6>
- Sigua, G. C., Novak, J. M., Watts, D. W., Cantrell, K. B., Shumaker, P. D., Szögi, A. A., & Johnson, M. G. (2014). Carbon mineralization in two ultisols amended with different sources and particle sizes of pyrolyzed biochar. *Chemosphere*, 103, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.024>
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D., & Nichols, K. A. (2012). Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>
- Tamaki, Y., & Mazza, G. (2010). Measurement of structural carbohydrates, lignins, and micro-components of straw and shives: Effects of extractives, particle size and crop species. *Industrial Crops and Products*, 31(3), 534–541. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.02.004>
- Tran, K. Q., Alonso, M. Z., Wang, L., & Skreiberg, Ø. (2017). Simultaneously boosting the mass and fixed-carbon yields of charcoal from forest residue via atmospheric carbonization. *Energy Procedia*, 105(1876), 787–792. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.390>
- Wang, B., Gao, B., & Fang, J. (2017). Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(22), 2158–2207. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1418580>
- Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., & Spokas, K. (2015). Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(9), 939–969. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1418580>

4.924180

- Xiong, X., Yu, I. K. M., Cao, L., Tsang, D. C. W., Zhang, S., & Ok, Y. S. (2017). A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel production, and pollution control. *Bioresource Technology*, 246, 254–270.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.163>
- Zaman, K. K., Balasundram, V., Ibrahim, N., Samsudin, M. D. M., Kasmani, R. M., Hamid, M. K. A., & Hasbullah, H. (2018). Effect of particle size and temperature on pyrolysis of palm kernel shell. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4), 118–124.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.35.22339>
- Zhao, S. X., Ta, N., & Wang, X. D. (2017). Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. *Energies*, 10(9).
<https://doi.org/10.3390/en10091293>