

Optimasi Proses Pirolisis dari Kulit Kayu Akasia *Crassiacarpa* Menjadi *Bio-char* Menggunakan Metode *Respon Surface Methodology Central Composite Design*

Siti Darmiyati, Syaiful Bahri*, Sunarno

Program Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Received : 03-07-2025

Accepted : 10-09-2025

Published : 15-11-2025

KEYWORDS

acacia crassiacarpa

Bio-char

pyrolysis

response surface methodology

*Correspondence author:

Email: syaifulbahri@eng.unri.ac.id



ABSTRACT

The problem of fossil energy crisis and the increasing carbon emissions have encouraged the search for environmentally friendly alternative energy sources, one of which is through the utilization of biomass into solid fuels such as bio-char. This study aims to optimize the pyrolysis process conditions to produce high-quality bio-char from *Acacia crassiacarpa* bark, a lignocellulosic waste from the forestry industry. The pyrolysis process was carried out in a batch reactor with variations in temperature (400-500°C), residence time (30-60 minutes), and NiMo/NZA catalyst concentration (2-6%) as independent variables. Optimization was carried out using the Response Surface Methodology approach with a Central Composite Design experimental design to obtain the optimum conditions. The results showed that the optimum conditions were obtained at a pyrolysis temperature of 400°C, residence time of 30 minutes, and catalyst concentration of 2%, resulting in a bio-char yield of 33.8% with a desirability value of 0.876. Meanwhile, the highest calorific value of 28 MJ/kg was achieved at the same temperature with a residence time of 90 minutes. This value exceeds the minimum standard for solid fuels according to the International Biochar Initiative and the European Biochar Certificate, which are generally in the range of >20-25 MJ/kg. Thus, the resulting bio-char not only has potential as an alternative energy source but also meets quality standards as an efficient and sustainable solid fuel.

1. PENDAHULUAN

Emisi karbon dioksida (CO₂) dari sektor energi terus menunjukkan tren peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Pada tahun 2024, emisi CO₂ dari bahan bakar fosil dan industri semen diperkirakan mencapai 37,4 miliar ton, naik sekitar 0,8% dibanding tahun sebelumnya (Carbon Brief, 2024). Jika emisi dari perubahan penggunaan lahan seperti deforestasi dan kebakaran hutan turut diperhitungkan, total emisi karbon global pada 2024 diperkirakan mencapai 41,6 miliar ton CO₂. Angka ini merupakan rekor tertinggi sepanjang sejarah dan mencerminkan kegagalan global dalam mengendalikan laju pertumbuhan emisi gas rumah kaca (IEA, 2024; Reuters, 2024). Peningkatan ini sebagian besar dipengaruhi oleh masih tingginya ketergantungan pada bahan bakar fosil, khususnya di negara berkembang yang mengalami pertumbuhan permintaan energi yang pesat. Selain itu, faktor alam seperti kebakaran hutan akibat fenomena El Niño juga turut menyumbang emisi karbon secara signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa upaya transisi energi menuju sumber yang rendah karbon perlu segera dipercepat guna mengejar target pengurangan emisi sebagaimana disepakati dalam Kesepakatan Paris. Oleh karena itu, pemanfaatan biomassa sebagai energi terbarukan menjadi sangat penting dalam upaya dikarbonisasi.

Salah satu biomassa potensial yang dapat dimanfaatkan adalah kulit kayu *Acacia crassiacarpa*, yaitu limbah dari industri kehutanan yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Limbah ini memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, sehingga cocok untuk

dikonversi menjadi produk energi padat seperti *bio-char* melalui proses pirolisis. Penggunaan *bio-char* sebagai bahan bakar padat atau sebagai penyimpan karbon di dalam tanah tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, tetapi juga berkontribusi dalam penyerapan karbon dari atmosfer. Dengan demikian, pemanfaatan limbah kulit kayu *A. crassicarpa* secara termokimia bukan hanya strategi pengelolaan limbah yang berkelanjutan, tetapi juga solusi mitigatif terhadap peningkatan emisi CO₂ global. *Biochar* merupakan sebuah bahan padat yang kaya akan karbon dan sebagai hasil konversi dari limbah atau sampah organik (biomassa pertanian) melalui *pyrolysis*, sebuah pembakaran yang tidak sempurna atau pembakaran dengan suplai oksigen yang terbatas (Neneng dkk., 2015).

Pirolisis merupakan teknik konversi termokimia yang digunakan untuk mengubah biomassa menjadi gas, *bio-oil*, dan *bio-char* melalui proses pemanasan dalam lingkungan *inert* atau tanpa oksigen. Teknologi ini dianggap efisien untuk memanfaatkan limbah biomassa menjadi energi terbarukan dan bahan kimia bernilai tambah (Wang dkk., 2023). Berdasarkan kecepatan pemanasan dan waktu tinggalnya, pirolisis diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama. Pirolisis lambat umumnya dilakukan pada suhu 350-450°C dengan waktu tinggal panjang (hingga beberapa jam), dan lebih difokuskan untuk menghasilkan *bio-char*. Pirolisis cepat dilakukan pada suhu 450-550°C dengan laju pemanasan tinggi dan waktu tinggal sangat singkat (kurang dari 2 detik), yang lebih mengutamakan produksi *bio-oil*. Sedangkan pirolisis suhu sedang berada di kisaran 450-500°C, menggabungkan karakteristik kedua metode dan dapat digunakan untuk keseimbangan produk (Nanda dkk., 2020; Mahmood dkk., 2021).

Dalam pengembangannya, penggunaan katalis seperti NiMo/NZA (logam Nikel dan Molibdenum pada zeolit alam) telah menunjukkan efektivitas dalam meningkatkan laju dekomposisi senyawa lignoselulosa serta meningkatkan kualitas produk pirolisis, baik dari segi *yield* maupun komposisi kimianya (Zhao dkk., 2022). Untuk mendapatkan kondisi operasi terbaik, metode statistik seperti *Response Surface Methodology* (RSM) dengan rancangan *Central Composite Design* (CCD) banyak digunakan karena mampu mengevaluasi pengaruh simultan dari suhu, waktu, dan konsentrasi katalis secara sistematis (Das dkk., 2020).

Response Surface Methodology (RSM) adalah metode statistik dan matematis yang digunakan untuk menganalisis, memodelkan, dan mengoptimalkan proses yang dipengaruhi oleh beberapa variabel independen. Tujuan utama dari RSM adalah untuk menentukan hubungan antara variabel input dan output, serta mencari kondisi optimum dari suatu proses atau respons yang diinginkan. Dalam konteks penelitian bioenergi, seperti pirolisis, RSM sangat berguna untuk meminimalkan jumlah eksperimen dan memaksimalkan hasil, baik dalam bentuk *yield*, efisiensi energi, maupun kualitas produk.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengoptimalkan produksi *bio-char* dari kulit kayu *A. crassicarpa* menggunakan metode RSM-CCD. Optimasi dilakukan terhadap tiga variabel utama, yaitu suhu pirolisis, waktu tinggal, dan konsentrasi katalis NiMo/NZA, untuk memperoleh *yield bio-char* yang maksimal dan berkualitas. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi konversi limbah biomassa menjadi energi terbarukan yang bernilai guna tinggi.

2. METODE

2.1. Alat dan bahan penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *hot plate*, *magnetic stirrer*, termometer, alat sentrifugasi, neraca analitik, oven, tabung reaksi, cawan porselen, cawan petri, kertas saring, corong kaca, pipet tetes, batang pengaduk, aluminium foil, kuvet, botol sampel, tabung dan regulator gas N₂, O₂ dan H₂, reaktor pirolisis, kondensor, piknometer, viskometer Ostwald, gelas piala, erlenmeyer, dan corong. Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain : limbah kulit kayu A. *Crassiacarpa*, zeolit alam, asam sulfat pekat (H₂SO₄) dengan kemurnian 98% *pro analysis* (Merck) yang diencerkan hingga mencapai konsentrasi 7M, nikel(II) nitrat heksahidrat (Ni(NO₃)₂·6H₂O) dengan kemurnian ≥98% (Sigma-Aldrich), amonium heptamolibdat tetrahidrat ((NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O) dengan kemurnian ≥99% (Merck), aquades hasil destilasi laboratorium, gas nitrogen (N₂) dengan kemurnian 99,9% dan gas hidrogen (H₂) dengan kemurnian 99,99%, serta natrium hidroksida (NaOH) dalam bentuk pelet dengan kemurnian ≥97% (Smart Lab).

2.2. Prosedur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan tahap persiapan bahan baku biomassa, yaitu kulit kayu *Acacia crassiacarpa* dikeringkan selama 2-3 hari, Setelah itu biomassa digiling menggunakan blender dan diayak dengan ukuran mesh 40 untuk mendapatkan partikel berukuran seragam. Proses dilanjutkan dengan delignifikasi menggunakan larutan NaOH 10% (b/v) dengan perbandingan biomassa dan larutan sebesar 1:10 (g/mL), dilakukan pada suhu 90°C selama 2 jam di bawah pengadukan konstan. Setelah selesai, padatan dicuci hingga netral menggunakan aquades dan dikeringkan kembali.

Tahap berikutnya adalah aktivasi katalis NiMo/NZA, yaitu zeolit alam (NZA) yang telah diaktivasi termal dan diimpregnasi dengan larutan logam nikel nitrat (Ni(NO₃)₂·6H₂O) dan amonium molibdat ((NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O) melalui metode impregnasi basah. Katalis dikeringkan dan di kalsinasi pada suhu 500°C selama 4 jam untuk mendapatkan fasa aktif katalitik. Diagram prosedur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Setelah katalis dan bahan baku siap, dilakukan proses pirolisis menggunakan reaktor *batch* yang tertutup dan *inert* (tanpa oksigen), dengan variabel operasi yang telah ditentukan berdasarkan rancangan eksperimen RSM CCD menggunakan perangkat lunak Design Expert versi 13 untuk memperoleh kondisi proses yang optimal. Produk padat (*bio-char*) yang dihasilkan kemudian dikumpulkan, ditimbang, dan dianalisis untuk menentukan *yield* dan nilai kalor, kadar abu.

Perhitungan *Yield bio-char* :

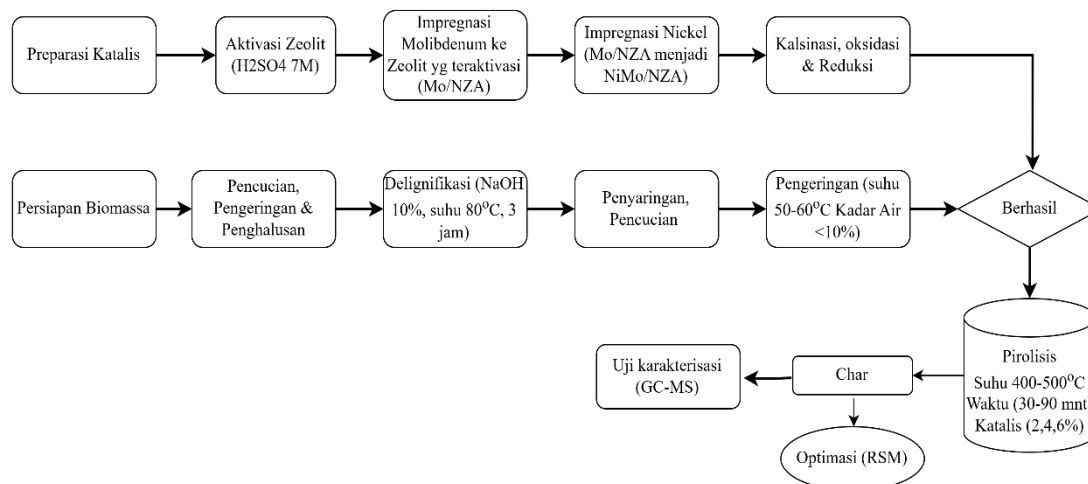
$$Yield Bio Oil = \frac{Massa bio char}{Massa bahan baku} \times 100\% \quad (1)$$

Perhitungan nilai kalor :

$$q_{vf} = \frac{(\varepsilon \times \theta) - Q_{fuse} + Q_{ign}}{m_f} \quad (2)$$

Perhitungan kadar abu :

$$\% Abu = \frac{(m_{cawan+abu} - m_{cawan})}{(m_{cawan+sampel} - m_{cawan})} \times 100\% \quad (3)$$



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Optimasi Proses Pirolisis *Bio-char*

Pemodelan Optimasi menggunakan *software Design Expert V.13* digunakan untuk menunjukkan respons *bio-char* sebagai fungsi dari variabel bebas yaitu katalis, suhu dan waktu. Pemodelan dirancang menggunakan rancangan percobaan CCD.

Tabel 1. Fit Summary Yield Bio-char

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R ²	Predicted R ²	
Linear	0.0004	0.2630	0.6551	0.5344	Suggested
2FI	0.8671	0.1987	0.5879	-0.3457	
Quadratic	0.1044	0.3014	0.7265	-0.2039	Aliased
Cubic	0.3014		0.8318	-8.0688	

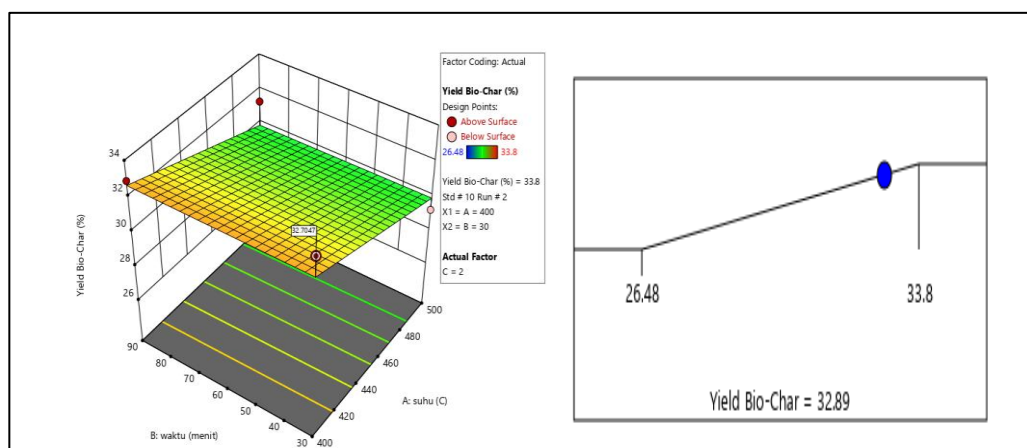
Tabel 2. Analysis Fit Statistic

Parameter	Nilai
R ²	0.8629
Adjusted R ²	0.6551
Predicted R ²	0.5344
Adeq Precision	10.8026
Std. Dev.	1.23
Mean	29.89
C.V. %	4.1

Berdasarkan Tabel 1, hasil *fit summary yield bio-char* diperoleh bahwa model linier merupakan model yang paling sesuai untuk memprediksi *yield bio-char*. Hal ini didasarkan pada nilai *p-value sequential* sebesar 0,0004 yang jauh lebih kecil dari 0,05, mengindikasikan bahwa model linier signifikan dalam menjelaskan hubungan antara variabel bebas terhadap *yield*. Di sisi lain, nilai *lack of fit* sebesar 0,2630 menunjukkan bahwa model linier tidak memiliki penyimpangan berarti terhadap variasi data eksperimen, sehingga layak digunakan sebagai alat prediksi. Nilai *Adjusted R²* sebesar 0,6551 dan *Predicted R²* sebesar 0,5344 mencerminkan bahwa model ini dapat menjelaskan lebih dari setengah variabilitas data dan mampu memprediksi dengan tingkat akurasi yang dapat diterima. Perbedaan antara kedua nilai *R²* tersebut tidak melebihi 0,2, yang menurut referensi valid masih dianggap konsisten dan stabil untuk keperluan prediktif dalam desain eksperimen (Jia dkk., 2020).

Sementara itu, model kuadratik dan interaksi dua faktor (2FI) tidak direkomendasikan, karena nilai *Predicted R²* negatif yang menandakan performa model lebih buruk dibandingkan rata-rata data itu sendiri. Hal ini menyiratkan bahwa penambahan parameter kuadratik atau interaksi tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kualitas model (Zhou dkk., 2021). Selain itu, nilai *R²* total sebesar 0,8629 menunjukkan bahwa model ini mampu menangkap lebih dari 86% variasi dari data asli sebelum koreksi, yang tergolong sangat baik. *Adequate Precision* sebesar 10,8026, yaitu besar dari 4, menunjukkan bahwa model memiliki sinyal yang cukup kuat untuk dijadikan dasar pengambilan keputusan dalam proses optimasi (Bezerra dkk., 2020). Di samping itu, koefisien variasi (C.V.) sebesar 4,1% menunjukkan bahwa data eksperimen memiliki tingkat sebaran yang rendah, mengindikasikan bahwa eksperimen berjalan konsisten dan presisi (Bas & Boyaci, 2019). Dengan melihat keseluruhan parameter statistik tersebut, model linier dinilai paling tepat digunakan untuk meramalkan *yield bio-char* berdasarkan kombinasi suhu, waktu, dan konsentrasi katalis. Model ini tidak hanya signifikan secara statistik, tetapi juga memberikan akurasi dan kestabilan yang baik untuk proses optimasi.

Proses optimasi dilakukan untuk mendapatkan suatu formula dengan respons-respons yang optimal. Nilai *desirability* yang diperoleh mendekati satu adalah respons yang paling optimal. Komponen-komponen yang di optimasi diberikan pembobotan kepentingan untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Pembobotan kepentingan ini dinamakan *importance* yang dapat dipilih mulai dari 1 (+) hingga 5 (+++++) tergantung kepentingan variabel respons yang diinginkan. Semakin banyak tanda positif yang diberikan menunjukkan tingkat kepentingan variabel respons yang semakin tinggi.



Gambar 2. 3D *Surface* dan *Contour Plot* dan Hasil Optimasi Pirolisis *bio-char* pengaruh Suhu dan Waktu terhadap *Yield bio-char*

Berdasarkan Gambar 2, hasil analisis optimasi menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) dengan desain *Central Composite Design* (CCD), diperoleh kondisi optimum untuk produksi *yield bio-char* dari kulit kayu *Acacia crassiparva* pada suhu pirolisis 400°C, waktu tinggal 30 menit, dan konsentrasi katalis NiMo/NZA sebesar 2%, dengan nilai *desirability* sebesar 0,876 diperoleh *yield bio-char* tercatat cukup tinggi, yaitu 33,8%. Nilai *desirability* mendekati 1 menunjukkan bahwa kombinasi variabel tersebut sangat optimal untuk mencapai tujuan respons, yaitu *yield bio-char* yang tinggi. Suhu 400°C merupakan suhu menengah dalam proses pirolisis, yang tergolong sebagai kondisi *slow pyrolysis*. Pada suhu ini, fraksi volatil belum terurai secara maksimal, sehingga sebagian besar senyawa karbon tetap berada dalam fase padat (*bio-char*). Berdasarkan grafik, dapat diamati bahwa *yield bio-char* menurun secara bertahap seiring peningkatan suhu dan waktu pirolisis. ketika suhu dinaikkan hingga 500°C dan waktu tinggal diperpanjang sampai 90 menit, *yield bio-char* turun hingga mencapai nilai mendekati 26,48%. Penurunan ini sesuai dengan mekanisme dasar pirolisis: suhu dan waktu yang tinggi menyebabkan dekomposisi senyawa organik menjadi fraksi volatil (*bio-oil* dan gas), sehingga sisa padatan (*bio-char*) semakin berkurang. Menurut Lehmann dan Joseph (2009), suhu tinggi meningkatkan laju devolatilisasi dan dekarboksilasi, mengubah biomassa menjadi gas dan tar, yang menyebabkan penurunan berat padatan *bio-char*. Selain itu, Yang dkk. (2007) juga melaporkan bahwa hemiselulosa, selulosa, dan lignin memiliki laju dekomposisi berbeda, di mana hemiselulosa terurai pada suhu lebih rendah (~220-315°C), sedangkan lignin tetap stabil hingga suhu tinggi (>500°C), namun lambat bereaksi, sehingga mempengaruhi kualitas dan kuantitas *bio-char*.

Menurut Jia dkk. (2020), pirolisis biomassa pada suhu 350-450°C mampu menghasilkan *bio-char* dengan *yield* tinggi dan stabilitas karbon yang baik, yang sangat cocok untuk aplikasi sebagai bahan bakar padat maupun amandemen tanah (Jia dkk., 2020). Penggunaan katalis NiMo/NZA sebesar 2% terbukti efektif dalam mempercepat dekomposisi hemiselulosa dan selulosa, namun tetap menjaga struktur padat yang menghasilkan *bio-char*. Dalam studi oleh Zhou dkk. (2021), katalis berbasis logam transisi seperti Ni dan Mo menunjukkan selektivitas tinggi dalam mempercepat pemutusan ikatan C-O dan C-C tanpa menyebabkan dekarbonisasi berlebihan, sehingga tidak menurunkan *yield bio-char* secara signifikan (Zhou dkk., 2021).

Waktu tinggal selama 30 menit merupakan durasi yang cukup untuk mencapai reaksi pirolisis yang stabil, tanpa terjadi over-pirolisis yang dapat menurunkan *yield bio-char*. Sejalan dengan temuan Mohan dkk. (2022), waktu pirolisis yang terlalu lama (di atas 60 menit) cenderung meningkatkan pelepasan gas ringan dan menurunkan hasil padatan (Mohan dkk., 2022). Kombinasi suhu sedang, katalis rendah, dan waktu singkat ini menghasilkan nilai *desirability* sebesar 0,876, yang secara statistik menunjukkan bahwa model RSM-CCD berhasil mengidentifikasi titik optimum yang mendekati kondisi ideal. Hasil ini juga menunjukkan efisiensi energi yang baik dan potensi skalabilitas dalam penerapan teknologi pirolisis berbasis katalis untuk pengolahan limbah lignoselulosa. Penelitian oleh Sohi dkk. (2010) mendukung hasil penelitian ini, menyatakan bahwa pirolisis cepat (*fast pyrolysis*) pada suhu tinggi akan mengutamakan produksi *bio-oil*, sedangkan *slow pyrolysis* dengan suhu rendah dan waktu tinggal singkat menghasilkan lebih banyak *bio-char*. Oleh karena itu, untuk mendapatkan *yield bio-char* optimal, kombinasi suhu sedang (~400-450°C) dan waktu yang tidak terlalu lama (<60 menit) adalah pilihan terbaik.

Yield pada penelitian ini tergolong tinggi jika dibandingkan dengan hasil beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan biomassa berbeda dan tanpa katalis. Zhang dkk. (2019) melaporkan bahwa pirolisis kayu keras (*hardwood chips*) tanpa katalis pada suhu 500°C selama 60 menit menghasilkan *yield bio-char* sekitar 28-30%, yang lebih rendah dibandingkan penelitian ini meskipun dilakukan pada suhu yang lebih tinggi (Zhang dkk., 2019). Penurunan *yield* pada suhu tinggi ini sesuai dengan prinsip dasar pirolisis, di mana semakin tinggi suhu dan waktu tinggal, semakin banyak senyawa volatil yang terurai, sehingga fraksi padat (*bio-char*) berkurang. Penelitian Fidel dkk. (2017) menggunakan *switchgrass* sebagai bahan baku dan melaporkan *yield bio-char* tertinggi sebesar 35,6% pada suhu 350°C. Namun, perlu dicatat bahwa kondisi tersebut tanpa penggunaan katalis, serta bahan baku *switchgrass* memiliki komposisi kimia yang berbeda dibandingkan kulit kayu *Acacia crasscarpa* (Fidel dkk., 2017). Sementara itu, Yuan dkk. (2015) dalam penelitiannya terhadap jerami gandum melaporkan *yield* sekitar 30-32% pada suhu 450°C dan waktu tinggal 60 menit (Yuan dkk., 2015). Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa *yield bio-char* dari penelitian ini masih kompetitif bahkan dalam kondisi yang lebih hemat energi (suhu dan waktu lebih rendah).

Perbandingan ini mengindikasikan bahwa penggunaan katalis NiMo/NZA pada suhu sedang dan waktu relatif singkat mampu meningkatkan efisiensi pirolisis untuk menghasilkan *bio-char* secara optimal. Selain itu, pendekatan optimasi dengan metode *Response Surface Methodology* (RSM) *Central Composite Design* (CCD) juga memberikan keunggulan dalam menentukan kombinasi parameter proses yang efisien secara statistik dan ekonomis. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat dikatakan lebih unggul secara praktis dan berpotensi diterapkan dalam skala industri dengan bahan baku limbah lignoselulosa lokal.

3.2. Nilai Kalor *bio-char*

Nilai kalor merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kualitas *bio-char* sebagai bahan bakar padat. *bio-char* memiliki nilai kalor yang cukup tinggi (20-30 MJ/kg), tergantung pada bahan baku dan suhu pirolisis, sehingga menjadikan *bio-char* sebagai bahan bakar padat yang potensial untuk menggantikan batubara. Kondisi optimum nilai kalor pada penelitian ini adalah 28 MJ/kg, yang diperoleh pada suhu pirolisis 400°C, waktu tinggal 90

menit, dan penggunaan katalis NiMo/NZA sebanyak 2%. Nilai ini tergolong sangat baik dan menunjukkan bahwa *bio-char* yang dihasilkan layak untuk digunakan sebagai bahan bakar padat alternatif menggantikan batubara kelas rendah. Nilai kalor atau *Higher Heating Value* (HHV) merupakan parameter utama dalam menilai potensi energi dari *bio-char*. HHV yang tinggi menandakan bahwa senyawa karbon dalam *bio-char* masih tersimpan dalam bentuk padatan dengan struktur aromatik yang stabil dan kaya energi. Pada suhu 400°C, sebagian besar hemiselulosa dan selulosa telah terdekomposisi, sedangkan lignin yang kaya karbon aromatik mengalami konversi menjadi struktur karbon padat yang meningkatkan nilai kalor (Jia dkk., 2020). Penelitian sebelumnya oleh Singh dkk. (2021) menyebutkan bahwa nilai kalor *bio-char* hasil pirolisis dari limbah lignoselulosa berkisar antara 20-30 MJ/kg, tergantung pada suhu dan jenis biomassa yang digunakan. Penggunaan katalis NiMo/NZA berperan penting dalam meningkatkan kualitas *bio-char*. Katalis ini mendorong pembentukan ikatan karbon-karbon aromatik serta menurunkan pelepasan volatil, sehingga fraksi karbon padat lebih tinggi.

Menurut Zhou dkk. (2021), katalis logam seperti Ni dan Mo dapat mempercepat reaksi deoksigenasi dan aromatisasi selama pirolisis, yang berkontribusi pada peningkatan densitas energi *bio-char*. Durasi pirolisis yang lebih lama, yakni 90 menit, memberikan waktu yang cukup untuk penyelesaian reaksi termal dan stabilisasi struktur karbon. Namun, suhu tetap dijaga pada tingkat sedang (400°C) agar degradasi termal tidak berlebihan, sehingga tidak mengurangi *yield* atau membakar karbon menjadi abu. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Manya (2012), yang menemukan bahwa pirolisis pada suhu menengah selama periode waktu yang lebih lama menghasilkan *bio-char* dengan HHV optimal. Dengan HHV sebesar 28 MJ/kg, *bio-char* dari kulit kayu *Acacia crassicaarpa* dapat dikategorikan sebagai *biofuel* berkualitas tinggi. Sebagai perbandingan, batubara lignit memiliki nilai kalor sekitar 15-20 MJ/kg, sedangkan *bio-char* yang dihasilkan dalam penelitian ini melebihi standar minimum yang ditetapkan dalam SNI 01-6235-2000 untuk briket arang, yaitu 5.000 kcal/kg (~20,9 MJ/kg). Oleh karena itu, *bio-char* ini berpotensi besar digunakan dalam aplikasi energi seperti *co-firing* di PLTU, pemanas industri, atau sebagai substitusi briket batu bara dalam skala rumah tangga.

4. KESIMPULAN

Kondisi optimum untuk produksi *bio-char* dari kulit kayu *Acacia crassicaarpa* adalah pada suhu pirolisis 400°C, waktu tinggal 30 menit, dan konsentrasi katalis NiMo/NZA sebesar 2%. Pada kondisi ini, diperoleh *yield bio-char* sebesar 33,8% dengan nilai *desirability* 0,876, yang menunjukkan bahwa proses optimasi yang dilakukan memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Selain itu, nilai kalor tertinggi yang dicapai sebesar 28 MJ/kg pada suhu yang sama dengan waktu tinggal 90 menit, menandakan bahwa *bio-char* yang dihasilkan memiliki potensi sebagai bahan bakar padat berkualitas tinggi. Jika dibandingkan dengan standar kualitas bahan bakar menurut *European Biochar Certificate (EBC)* dan *International Biochar Initiative (IBI)*, nilai kalor tersebut sudah memenuhi bahkan melebihi standar minimum yang umumnya berada pada kisaran >20-25 MJ/kg. Oleh karena itu, *bio-char* yang dihasilkan dari kulit kayu *A. crassicaarpa* melalui proses pirolisis dengan kondisi tersebut dapat dikategorikan sebagai bioenergi yang efisien dan berdaya saing tinggi, tidak hanya dari segi kuantitas *yield*, tetapi juga dari segi kualitas energi yang terkandung di dalamnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Rahbi, A. S., Onwudili, J. A., & Williams, P. T. (2019). The influence of process conditions on the properties of biochar produced from food waste via pyrolysis. *Waste Management*, 87, 716-725. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.009>
- Bas, D., & Boyaci, I. H. (2019). Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 836-845. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.024>
- Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2020). Response Surface Methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965-977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
- Carbon Brief. (2024). Global CO₂ emissions in 2024 reach new record high. <https://www.carbonbrief.org>
- Cheng, Y., Lin, J., & Zhang, Y. (2020). Effects of pyrolysis parameters on physicochemical properties of biochar: A review. *Bioresource Technology*, 313, 123658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123658>
- Das, A. K., Das, D., & Sarkar, S. (2020). Process parameter optimization of biomass pyrolysis using response surface methodology: A case study with sugarcane bagasse. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(18), 2231-2241. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1610192>
- Fidel, R. B., Laird, D. A., & Thompson, M. L. (2017). Evaluation of modified biochars as adsorbents for sulfate in water. *Water Research*, 113, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.054>
- IEA (International Energy Agency). (2024). Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2024. <https://www.iea.org>
- Jia, Y., Zhai, Y., Wang, T., Liu, X., Zhu, Y., & Zhu, Y. (2020). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochar derived from biomass waste: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 147, 104780. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104780>
- Mahmood, W., Qazi, M. S., & Basit, A. (2021). Statistical optimization of biochar *yield* from cotton stalks using RSM-CCD: Pyrolysis behavior and product characterization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105532. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105532>
- Manya, J. J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental Science & Technology*, 46(15), 7939-7954. <https://doi.org/10.1021/es301029g>
- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. Jr. (2022). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review. *Bioresource Technology*, 312, 123615. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123615>
- Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2020). Biochar as an eco-friendly and sustainable catalyst for biomass pyrolysis and gasification. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1945-1961. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00991-9>
- Neneng L. N., Agus D. M., Hayati, R., & Siti R.U. (2015). Pemanfaatan biochar untuk restorasi tanah. Balai Penelitian Tanah, Badan Litbang Pertanian. <http://balittanah.litbang.pertanian.go.id>
- Reuters. (2024). World carbon emissions hit record levels in 2024 despite climate pledges. <https://www.reuters.com>

- Ronsse, F., Masek, O., & Sohi, S. P. (2022). Biochar production and application: A state-of-the-art review on physical and energy properties. *Environmental Science & Technology Reviews*, 10(3), 415-432. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01113>
- Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J., & Joseph, S. (2021). Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environmental Science & Technology*, 55(6), 3787-3796. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07783>
- Sohi, S. P., Lopez-Capel, E., Krull, E., & Bol, R. (2010). Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. *CSIRO Land and Water Science Report*. <https://publications.csiro.au>
- Wang, C., Li, J., Liu, Y., & Zhang, X. (2023). Thermochemical conversion of biomass into bio-oil and biochar: A review on recent developments in catalytic pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113292>
- Wang, Z., Chen, W., & Xu, Y. (2021). Catalytic effect of NiMo supported on zeolite for enhancing biochar quality from pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105171. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105171>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yuan, H., Lu, T., Huang, H., Zhao, D., Kobayashi, N., & Chen, Y. (2015). Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 284-289. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.010>
- Zhang, Y., Chen, D., He, P., & Shao, L. (2019). Impacts of feedstock and pyrolysis temperature on the characteristics of biochar produced from municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 264, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.082>
- Zhao, H., Song, Q., Wang, S., & Chen, W. (2022). NiMo/Zeolite catalyst for the upgrading of biomass pyrolysis vapors to improved bio-oil quality. *Fuel*, 322, 124158. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124158>
- Zhou, Y., Zheng, Z., Zhang, L., & Wu, Y. (2021). Effect of transition metal-based catalysts on biomass pyrolysis and product characteristics. *Fuel Processing Technology*, 218, 106838. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106838>