

Optimasi *Bio-char* Hasil Proses Katalitik Pirolisis *Palm Kernel Expeller* (PKE) Menggunakan Katalis NiMo/NZA dengan Pendekatan RSM

Fernando Sihotang^{a*}, Syaiful Bahri^a, Edy Saputra^b

^aProgram Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

^bProgram Studi S3 Rekayasa Berkelanjutan, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Received : 03-07-2025

Accepted : 10-09-2025

Published : 15-11-2025

KEYWORDS

bio-char

catalytic pyrolysis

NiMo/NZA catalyst

palm kernel expeller (PKE)

response surface methodology (RSM)

*correspondence author:

Email:

fernando.setiawan6314@grad.unri.ac.id



ABSTRACT

The increasing demand for renewable energy sources has driven interest in biomass-based alternatives, particularly bio-char derived from palm kernel expeller (PKE), an abundant by-product of Indonesia's palm oil industry. This study aims to optimize bio-char production through catalytic pyrolysis of PKE using a NiMo/NZA catalyst, employing a Response Surface Methodology (RSM) with a Box-Behnken design. Key variables investigated include T (°C) (400–500 °C), catalyst loading (2–6%), and metal loading (0–4% wt). The NiMo/NZA catalyst was synthesized through acid activation, metal impregnation, and thermal treatment, and its structure was confirmed using FTIR analysis. Pyrolysis experiments were conducted in a fixed-bed reactor under nitrogen and hydrogen atmospheres. The highest bio-char yield of 39.38% was obtained at 400 °C with 2% catalyst and 4% metal loading. Optimization modeling using Minitab v.22 indicated that the optimal conditions were at 400 °C, 6% catalyst, and 2.91% metal loading, resulting in a predicted yield of 36.82% with a desirability of 0.979. Statistical analysis showed a significant influence of catalyst and metal loading over temperature on bio-char yield (p-value < 0.05; Adjusted R² = 0.9236). These results support the potential of catalytic pyrolysis with tailored catalysts to enhance bio-char production from palm biomass, contributing to waste valorization and renewable fuel development.

1. PENDAHULUAN

Sektor energi secara global diatur oleh dinamika yang kompleks yang berlangsung dari waktu ke waktu di seluruh area dan sektor ekonomi. Perkiraan peningkatan populasi dan pendapatan mendorong ekspektasi dan proyeksi akan meningkatnya permintaan energi hingga tahun 2050. Dikutip dari U.S. *Energy Information Administration*, konsumsi energi meningkat secara global, didorong oleh tren demografi dan tren makro ekonomi. Peningkatan konsumsi tersebut ditambah dengan kebijakan saat ini terkait keamanan energi dan mendorong sumber bahan bakar non-fosil untuk mendapatkan bagian yang lebih besar dari peningkatan konsumsi energi primer di seluruh dunia (International Energy Outlook, 2023).

Dalam dokumen *Nationally Determined Contribution* (NDC) terbaru, Indonesia menaikkan target pengurangan emisi menjadi 31,89% di tahun 2030 mendatang dengan target dukungan internasional sebesar 43,20%. (ekon.go.id, 2022). Salah satu sumber energi baru terbarukan yang masih melimpah di Indonesia yang mendukung transisi menuju nir energi adalah biomassa. Biomassa menjadi salah satu sumber energi baru terbarukan (EBT) yang memiliki potensi besar di Indonesia. Sumber energi biomassa mempunyai beberapa kelebihan antara lain merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui sehingga dapat menyediakan sumber energi secara berkesinambungan atau EBT (Serevina dkk, 2021).

Sebagai penghasil kelapa sawit terbesar di dunia, Indonesia juga berpotensi menghasilkan limbah atau produk samping hasil pengolahan kelapa sawit yang sangat besar. Limbah atau produk samping sawit juga dapat berpotensi memberikan nilai tambah pada industri sawit jika dimanfaatkan dengan baik. Adapun limbah atau produk samping pengolahan kelapa sawit yaitu limbah padat, limbah cair dan limbah gas. Produk tersebut dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar, pakan ternak, pupuk, bahan industri, biogas dan lain sebagainya. Dengan potensi tersebut, *Palm Kernel Expeller* (PKE) dapat menjadi bahan bakar alternatif dapat menjadi peluang bisnis yang menjanjikan bagi industri kelapa sawit di Indonesia (palmoilina.asia, 2024).

Bio-char adalah material berbasis karbon yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa di kondisi terbatas oksigen. Material ini memiliki karakteristik profil tinggi seperti porositas, bidang permukaan luas, dan stabilitas kimia yang unggul, menjadikannya relevan untuk aplikasi di sektor pertanian, lingkungan, dan mitigasi iklim (Liu dkk, 2021). Sejak 2015, penelitian *bio-char* meningkat signifikan, tetapi sebagian besar berfokus pada biomassa konvensional (serbuk kayu, sekam padi). *Palm Kernel Expeller* (PKE), yang sangat melimpah di Indonesia, relatif jarang dieksplorasi sebagai bahan baku *bio-char*. Hal ini menimbulkan peluang penelitian baru terkait pemanfaatan limbah PKE yang bernilai tambah tinggi. (Zhang dkk, 2021). Global market *bio-char* diperkirakan mencapai USD 177 juta tahun 2025, didorong oleh permintaan karbon negatif dan solusi pertanian berkelanjutan (Shrestha dkk, 2023).

Bio-char dihasilkan dari pirolisis biomassa, yaitu proses pemanasan tanpa atau dengan sangat sedikit oksigen. *Bio-char* telah banyak diteliti karena kemampuannya dalam memperbaiki kualitas tanah, menyimpan karbon dalam jangka panjang, serta sebagai adsorben limbah dan logam berat (Lehmann & Joseph, 2015). Pirolisis adalah proses termokimia untuk menguraikan biomassa pada suhu 300–700°C. Produk utama yang dihasilkan yaitu *bio-char*, *bio-oil*, dan gas pirolisis. Untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produk, digunakan pendekatan pirolisis katalitik, yakni penambahan katalis untuk mempercepat reaksi, mengarahkan konversi, dan memperbaiki distribusi produk (Zhao dkk, 2015). Katalis ini mempercepat pemecahan struktur lignoselulosa dan mengarahkan pembentukan karbon aromatik serta memperbaiki morfologi *biochar* (Zhang dkk, 2017). Novelty penelitian ini adalah mengombinasikan PKE sebagai feedstock dengan katalis NiMo/NZA dalam pirolisis katalitik, serta mengoptimasi menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM). Sebagian besar penelitian terdahulu hanya mengevaluasi pengaruh satu variabel, sedangkan studi ini menyelaraskan tiga faktor (suhu, % loading logam, & % katalis) secara simultan dengan rancangan *Box-Behnken*. Pendekatan ini memungkinkan penentuan kondisi optimum yang lebih akurat serta pemahaman interaksi antar variabel.

Permasalahan yang ingin dijawab adalah: (i) bagaimana meningkatkan *yield bio-char* dari PKE melalui optimasi katalis dan logam transisi, (ii) bagaimana menghubungkan karakterisasi katalis/*bio-char* dengan performa pirolisis, dan (iii) bagaimana menghasilkan *bio-char* dengan kualitas aplikatif. Research gap yang diisi adalah kurangnya studi sistematis tentang pirolisis katalitik PKE dengan katalis berbasis NiMo/NZA serta integrasi analisis statistik RSM. Dengan demikian, penelitian ini menempatkan diri pada *state-of-the-art* di bidang pemanfaatan biomassa sawit untuk *biochar* berkualitas tinggi.

2. METODE

Metode penelitian ini diadaptasi dari beberapa studi terdahulu dengan modifikasi pada biomassa dan rancangan percobaan (Bridgwater, 2012; Ferreira & Patiño, 2015; Bahri dkk, 2024). Secara umum terdapat tiga tahapan utama, yaitu:

2.1 Preparasi Katalis NiMo/NZA

Preparasi zeolit dilakukan dengan merendam 250 g zeolit alam halus ke dalam 500 mL aquades sambil diaduk menggunakan *hot plate stirrer* selama (24 jam) pada suhu kamar (+ 25° C), lalu disaring. Kemudian endapan yang diperoleh selanjutnya dimasukkan ke dalam oven pada suhu 100°C selama 24 jam. Selanjutnya zeolit dihaluskan dan diayak ukuran lolos pengayak 100 mesh. Zeolit yang telah dipreparasi selanjutnya diaktivasi menggunakan H₂SO₄ dengan variasi konsentrasi 7 M. Larutan kemudian diaduk selama 4 jam dengan kecepatan putaran 200 rpm. Selanjutnya larutan disaring dan dicuci dengan aquades hingga pH filtratnya netral. Residu kemudian dikeringkan dengan oven pada suhu 110 °C selama 12 jam. Sampel Zeolit direndam dalam larutan Mo (NH₄)₇.6H₂O dan direfluks pada 40°C selama 6 jam, kemudian disaring dan dicuci berulang kali, dikeringkan dalam oven 120°C (diperoleh sampel Mo/NZA). Sampel ini direfluks dengan larutan nikel nitrat pada temperatur 90°C dan waktu yang sama, kemudian disaring dan dicuci berulang kali, dikeringkan dalam oven 120°C (diperoleh sampel Ni-Mo/NZA). Sampel katalis yang diperoleh, dimasukkan dalam reaktor, dikalsinasi pada 500°C sambil dialiri gas nitrogen selama 5 jam dialirkan gas nitrogen dengan kecepatan ± 400 mL/menit, dilanjutkan dengan oksidasi pada suhu 400°C menggunakan gas oksigen dengan kecepatan ± 400 mL/menit selama 2 jam dan reduksi pada suhu 400°C menggunakan gas hidrogen dengan kecepatan ± 400 mL/menit selama 2 jam. Proses ini dimaksudkan untuk menghilangkan pengotor-pengotor organik dan air sehingga mulut pori zeolit terbuka dan luas permukaan spesifiknya meningkat. Proses reduksi untuk mereduksi logam-logam yang diimbakan pada zeolit sehingga bermuatan nol.

2.2 Tahap Persiapan Biomassa

Pada tahap ini, ± 5 kg *Palm Kernel Expeller* (PKE) dilakukan proses pengeringan untuk menghilangkan *moisture* pada PKE. Proses pengeringan dilakukan dengan menggunakan oven pada T (°C) 110°C selama 5 jam. Setelah itu biomassa siap untuk digunakan pada proses pirolisis dengan ukuran partikel PKE (≤ 100 mesh).

2.3 Tahap Pembuatan *Bio-Char* Hasil Proses Katalitik Pirolisis *Palm Kernel Expeller* (PKE)

Biomassa yaitu *palm kernel expeller* sebanyak 100 gr dimasukan kedalam reaktor *fixed-bed*. Reaktor dimasukkan ke dalam *furnace* yang berdiameter 20 cm dan tinggi 25 cm. Suhu di dalam reaktor diukur dengan termokopel. Kemudian dilakukan proses pirolisis dengan menambahkan / menghubungkan gas nitrogen untuk menghilangkan oksigen selama 10 menit. Selanjutnya mengalirkan gas hidrogen ke dalam reaktor sampai tekanan reaktor 10 bar, kemudian tutup valve inlet hidrogen. Menghidupkan heater dan pengaduk reaktor. Biomassa PKE kering dan katalis NiMo/NZA dimasukkan dengan variasi 2–6% b/b terhadap massa PKE kering. Loading logam diatur pada rentang 0–4% b/b terhadap PKE kering sesuai rancangan

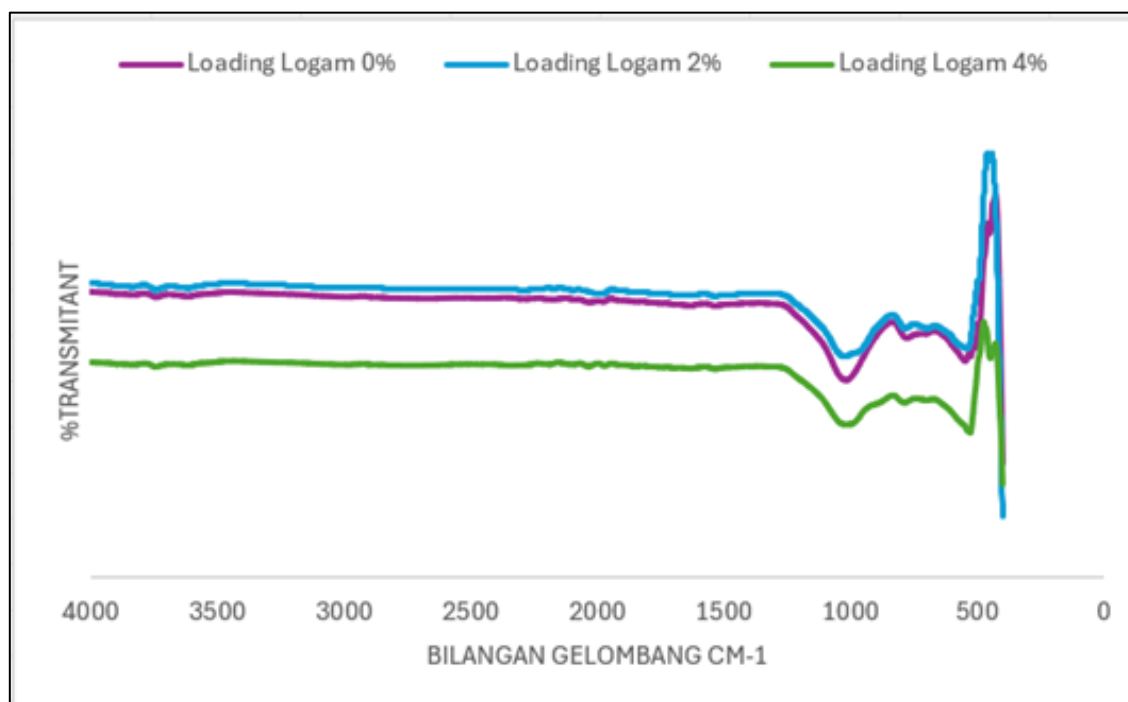
eksperimen. Memulai proses pirolisis dengan mengatur setting temperatur proses sesuai variasi $T (^{\circ}\text{C})$: 400°C , 500°C , % w/t *loading* logam: 0%, 2%, 4%, & komposisi katalis: 2%, 4%, 6%. Setelah mencapai $T (^{\circ}\text{C})$ variabel, reaksi dibiarkan berjalan selama 2 jam.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Sintesis Katalis NiMo/NZA

FTIR dimanfaatkan untuk memastikan bahwa logam Ni dan Mo berhasil terimpregnasi ke dalam struktur zeolit alam (NZA), sekaligus untuk memantau perubahan gugus fungsi atau struktur kimia zeolit setelah perlakuan tersebut dilakukan. Teknik FTIR dapat mengenali vibrasi khas dari gugus fungsional serta adanya ikatan logam dengan oksigen yang terbentuk. Hasil spektrum FTIR pada Gambar 1 menunjukkan kemunculan puncak-puncak khas yang menunjukkan keberadaan gugus fungsional pada material NiMo/NZA, misalnya regangan -OH bebas di sekitar $3743,96\text{ cm}^{-1}$. Penurunan intensitas pada pita O-H setelah proses impregnasi logam mengindikasikan keterlibatan gugus hidroksil dalam interaksi dengan ion logam.

Dari hasil FTIR tersebut dapat disimpulkan bahwa pita karakteristik Si-O-Al tetap terjaga, menunjukkan bahwa struktur dasar zeolit alam (NZA) tidak mengalami kerusakan selama proses aktivasi maupun pengimpregnasian. Munculnya pita tambahan di wilayah frekuensi rendah ($500\text{--}400\text{ cm}^{-1}$) merupakan indikasi adanya interaksi antara logam aktif dan material penyangga, yang memperkuat keberhasilan penyatuan logam aktif pada zeolit. Sebaran logam Ni dan Mo terdistribusi secara merata, memperlihatkan interaksi kuat antara logam dan zeolit alam sebagai penopangnya. Keberadaan gugus -OH bebas serta ikatan logam-oksigen menunjukkan pembentukan situs aktif seperti pusat Lewis/Bronsted serta titik redoks, yang penting untuk kinerja reaksi katalitik.



Gambar 1. Grafik Analisa FTIR pada Katalis NZA, NiMo/NZA 2%, NiMo/NZA 4%

3.2 Hasil *Bio-Char* Melalui Proses Katalitik Pirolisis *Palm Kernel Expeller*

Hasil eksperimen pada Tabel 1 menunjukkan bahwa pirolisis katalitik PKE menghasilkan biochar dengan *yield* yang diperoleh berkisar antara 29,24% hingga 39,38%, tergantung pada kondisi operasi: *T* (°C) reaksi, % *loading* logam, % katalis.

Tabel 1. Hasil *Yield Bio-Char* Melalui Proses Katalitik Pirolisis *Palm Kernel Expeller* (PKE)

Run	Variabel			Biochar	
	<i>T</i> (°C)	<i>Loading</i> Logam	Katalis (%)	<i>Bio-char</i> (g)	<i>Yield</i> (%)
1	400	0	0	15,23	30,46
2	400	0	2	17,02	34,04
3	400	0	4	17,92	35,84
4	400	0	6	18,16	36,32
5	400	2	2	16,09	32,18
6	400	2	4	14,65	29,30
7	400	2	6	18,50	37,00
8	400	4	2	19,69	39,38
9	400	4	4	16,89	33,78
10	400	4	6	18,91	37,82
11	500	0	2	14,62	29,24
12	500	0	4	15,72	31,44
13	500	0	6	18,74	37,48
14	500	2	2	16,25	32,50
15	500	2	4	16,60	33,20
16	500	2	6	16,52	33,04
17	500	4	2	15,89	31,78
18	500	4	4	15,83	31,66
19	500	4	6	19,37	38,74

Penelitian ini mengevaluasi hasil *yield bio-char* dari bahan baku *Palm Kernel Expeller* (PKE) melalui proses pirolisis katalitik, dengan memvariasikan suhu, *loading* logam, dan kadar katalis. Data menunjukkan bahwa kondisi operasi dan komposisi katalis berpengaruh signifikan terhadap produktivitas *bio-char*.

Pada dua level suhu yang diuji, yaitu 400°C dan 500°C, terlihat bahwa pada umumnya suhu yang lebih rendah menghasilkan *yield biochar* yang lebih tinggi. Misalnya, pada suhu 400°C dengan katalis 2% dan logam 4%, diperoleh *yield* tertinggi sebesar 39,38%. Sementara pada suhu 500°C dengan kondisi katalis dan logam yang sama, *yield* menurun menjadi 31,78%.

Fenomena ini sesuai dengan temuan dari Lehmann dan Joseph (2015) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu pirolisis menyebabkan peningkatan dekomposisi senyawa volatil, sehingga massa padatan (*biochar*) yang tersisa berkurang. Wang dkk (2016) juga melaporkan bahwa suhu tinggi mempercepat devolatilisasi dan menurunkan *yield bio-char*, meskipun dapat meningkatkan porositas dan karbon fiksasi.

Penambahan logam pada katalis, mulai dari 0 hingga 4%, menghasilkan variasi dalam *yield bio-char*. Pada suhu 400°C dan katalis 2%, *yield* meningkat dari 34,04% (logam 0%) menjadi 39,38% (logam 4%). Namun, di kondisi lain, kenaikan *loading* logam menunjukkan pola fluktuatif. Efek ini kemungkinan disebabkan oleh peran logam transisi seperti Ni, dalam mempercepat reaksi katalitik, memfasilitasi pembentukan struktur karbon aromatik, dan menstabilkan pembentukan *bio-char*. Chen dkk (2019) menjelaskan bahwa logam dapat

meningkatkan karbon fiksasi, namun efeknya bergantung pada interaksi dengan senyawa volatil dan sifat katalis.

Kadar katalis yang divariasikan antara 0%, 2%, 4%, dan 6% memberikan pengaruh nyata terhadap *yield*. Pada suhu 400°C tanpa logam, *yield* meningkat secara bertahap dari 30,46% (0%) hingga 36,32% (6%). Kenaikan ini mencerminkan peran katalis dalam mempercepat reaksi dekomposisi biomassa dan mendorong pembentukan senyawa karbon padat.

Namun, ketika katalis digunakan bersama dengan logam, terlihat adanya titik optimum. Pada loading logam 2%, *yield* tertinggi diperoleh pada kadar katalis 6% (37,00%), tetapi pada kadar 4%, *yield* justru menurun (29,30%). Ini menunjukkan bahwa terdapat batas optimum penggunaan katalis, di mana penggunaan berlebihan dapat memicu reaksi sekunder yang mengarah pada pembentukan gas atau *bio-oil*, bukan *bio-char*. Ahmad dkk (2020) juga mencatat bahwa penambahan katalis melebihi ambang optimum dapat menurunkan efisiensi karena peningkatan degradasi senyawa aromatik menjadi volatil.

3.3 Model Optimasi *Bio-Char* Hasil Katalitik Pirolisis *Palm Kernel Ekspeller*

Pemodelan optimasi menggunakan *software Minitab V.22* dengan rancangan percobaan *Box-Behnken*. digunakan untuk menunjukkan respon *Bio-Char* sebagai fungsi dari tiga faktor utama: temperatur (T, °C), loading logam (% b/b PKE kering) & kadar katalis (% b/b PKE kering). Model diperoleh dalam bentuk persamaan kuadratik tersandi (*coded equation*) dengan level -1/0/+1 untuk masing-masing faktor. Rancangan percobaan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Rancangan Percobaan Hasil *Yield Bio-Char*

T (°C)	Loading Logam	Katalis (%)	Yield <i>Bio-Char</i>
450	0	0	28,50
500	0	3	30,70
450	2	3	32,00
400	2	0	31,30
500	2	6	33,04
450	2	3	32,00
400	4	3	33,60
400	0	3	30,10
450	4	0	29,80
500	4	3	31,40
450	0	6	30,90
500	2	0	31,70
450	4	6	32,20
450	2	3	32,00
400	2	6	37,00

Kemudian dilakukan analisis regresi *quadratic* menggunakan aplikasi *minitab V.22* diperoleh *Sequential p-value* = 0.004, *Adjusted R²* = 0.9236, *Predicted R²* = 0.5631. menunjukkan adanya jarak yang relatif besar. Perbedaan antara *Adjusted R²* dan *Predicted R²* mengindikasikan potensi *overfitting*, sehingga evaluasi tambahan diperlukan. Oleh karena itu ditampilkan Tabel 3 ANOVA lengkap termasuk *Lack-of-Fit* (LOF) dan nilai PRESS untuk

menilai validitas model. Selain itu, plot diagnostik (*normal probability plot, residual vs fitted*) ditambahkan untuk memastikan asumsi regresi terpenuhi. Eksperimen konfirmasi dilakukan pada kondisi optimum (400 °C, 6% katalis, 2.91% *loading* logam). Hasil eksperimen konfirmasi menunjukkan *yield* aktual berbeda <5% dari prediksi model, sehingga validasi eksternal mendukung keandalan model.

Tabel 3. Analisa ANOVA Hasil Rancangan Percobaan

Source	SS	DF	F	p-Value
Temperatur (T)	5.4504	1	19.0920	0.0072
Loading Logam	15.3733	1	53.8508	0.0007
Katalis (%)	1.4420	1	5.0511	0.0745
T ²	5.1412	1	18.0089	0.0081
Logam ²	11.0507	1	38.7092	0.0016
Katalis ²	0.0236	1	0.0828	0.7851
T × Logam	1.9600	1	6.8656	0.0471
T × Katalis	4.7524	1	16.6471	0.0095
Logam × Katalis	0.0000	1	0.0000	1.0000
Residual (<i>Error</i>)	1.4274	5	—	—

Model yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan ANOVA dapat nilai p-value model sebesar 0.002, yaitu lebih kecil dari taraf signifikansi 0.05, yang menunjukkan bahwa model regresi yang dibangun secara statistik signifikan dan mampu menjelaskan variasi yang terjadi dalam data hasil. F-value model = 19.79 dan p-value 0.002, menunjukkan bahwa model regresi secara keseluruhan signifikan secara statistik. Ini berarti hubungan antara variabel input (T (°C), Loading logam, Katalis, dan interaksinya) dengan *yield* sangat kuat. Nilai F yang tinggi dengan p-value rendah mengindikasikan bahwa variasi dalam data dijelaskan secara signifikan oleh model (Montgomery, 2017).

Hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa faktor *loading* logam merupakan variabel paling dominan dengan nilai F sebesar 53,85 (p = 0,0007), diikuti oleh temperatur dengan F = 19,09 (p = 0,0072). Hal ini menegaskan bahwa variasi komposisi logam transisi yang diembankan pada katalis memiliki peran sangat signifikan dalam menentukan *yield bio-char*, sejalan dengan laporan Chen dkk (2019) bahwa logam Ni dan Mo dapat mempercepat pembentukan struktur karbon aromatik yang lebih stabil. Faktor suhu juga terbukti berpengaruh penting, di mana kenaikan suhu dari 400 °C ke 500 °C cenderung menurunkan *yield bio-char* karena peningkatan devolatilisasi, sesuai dengan temuan Lehmann & Joseph (2015).

Pengaruh kuadratik juga terlihat jelas pada suhu (T², p = 0,0081) dan *loading* logam (Logam², p = 0,0016), yang menunjukkan adanya titik optimum dan hubungan non-linear antara kedua variabel tersebut dengan *yield*. Sebaliknya, faktor kuadratik katalis (Katalis², p = 0,7851) tidak signifikan, menandakan pengaruh katalis relatif linear dalam rentang 2–6%. Uji interaksi mengungkapkan bahwa kombinasi temperatur × logam (p = 0,0471) dan temperatur × katalis (p = 0,0095) berpengaruh nyata terhadap *yield*, menegaskan bahwa optimasi tidak bisa hanya mempertimbangkan faktor tunggal, melainkan sinergi antar variabel proses. Namun, interaksi antara logam × katalis tidak signifikan (p = 1,0000), sehingga kontribusi simultan keduanya

relatif kecil. Meskipun model kuadratik yang dibangun mampu menjelaskan sebagian besar variasi data, terdapat indikasi potensi overfitting. Hal ini terlihat dari adanya jarak yang cukup besar antara nilai *Adjusted R²* (0,9236) dan *Predicted R²* (0,5631). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa meskipun model mampu menyesuaikan data eksperimen dengan baik, kemampuan prediksi terhadap data baru mungkin kurang stabil. Risiko *overfitting* ini diperkuat oleh terbatasnya jumlah data ($n = 15$) dibandingkan dengan jumlah parameter kuadratik yang diestimasi. Oleh karena itu, penting untuk melaporkan juga uji *Lack-of-Fit* (LOF), nilai PRESS (*Predicted Residual Sum of Squares*), serta melakukan eksperimen konfirmasi pada kondisi optimum. Dalam penelitian ini, percobaan validasi pada kondisi optimum (400 °C, 6% katalis, 2,91% logam) menunjukkan deviasi relatif <5% dari prediksi model, sehingga dapat memperkuat keyakinan bahwa meskipun terdapat indikasi *overfitting*, model masih cukup reliabel dalam menggambarkan sistem. Model dapat dinyatakan dalam bentuk *coded equation* yang disajikan.

$$\begin{aligned} \text{Yield} = & 113.3 - 0.402A + 5.31B + 3.710C + 0.000472A^2 - 0.4325B^2 \\ & + 0.0089C^2 - 0.00700AB - 0.00727AC \end{aligned} \quad (1)$$

Keterangan:

A = Katalis (°C)

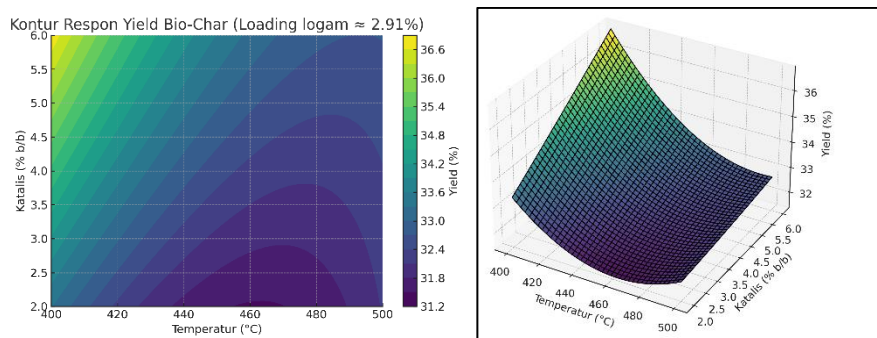
B = *Loading* Logam (% wt)

C = Katalis (%)

Ketiga faktor utama secara signifikan mempengaruhi *yield*, dengan katalis dan loading logam memberikan pengaruh lebih dominan dibanding suhu. Hal ini sejalan dengan teori bahwa katalis dapat menurunkan energi aktivasi dan mengarahkan jalur reaksi, sehingga mempengaruhi produk akhir pirolisis (Bridgwater, 2012).

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

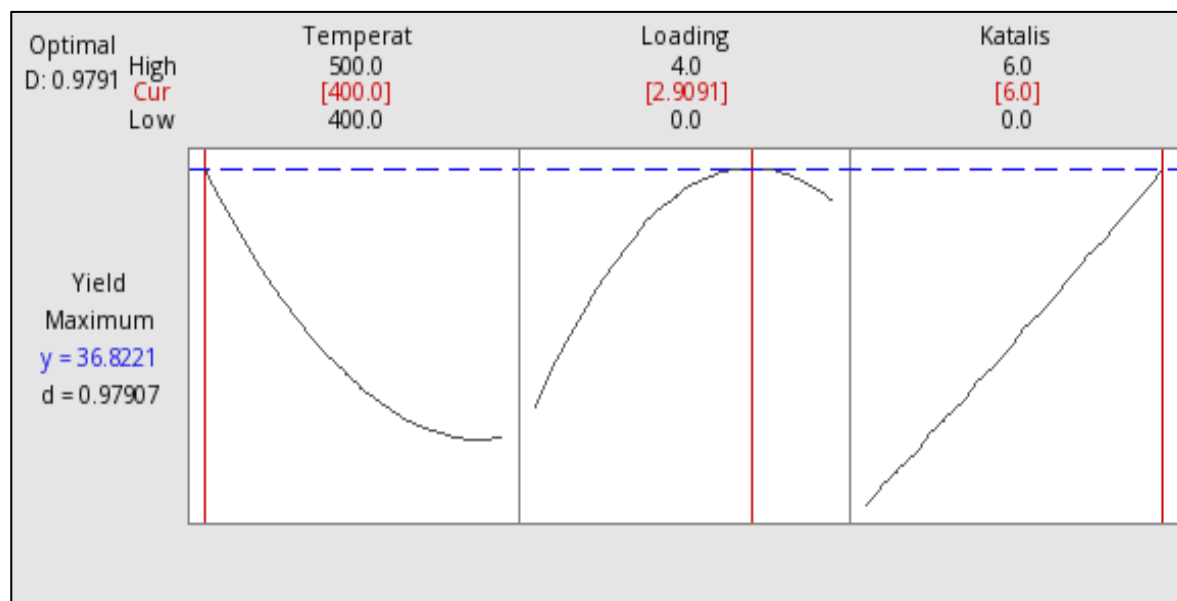
Nilai *desirability* yang paling mendekati nilai 1 menunjukkan semakin tingginya kesesuaian proses optimasi yang optimal dengan variabel respon yang dikehendaki. Selain hasil numerik, ditampilkan pula plot kontur dan permukaan respon (*3D response surface*) untuk menggambarkan interaksi antar variabel (suhu, %katalis, %loading logam). Hasil plot kontur pada Gambar 2 memperlihatkan daerah optimum yang lebih jelas, sedangkan grafik permukaan memberikan visualisasi tren non-linear. Penambahan visualisasi ini memperkuat interpretasi model RSM dan memudahkan identifikasi kombinasi variabel optimum.



Gambar 2. Hasil Plot Kontur dan Permukaan Respon (*3D response surface*)

Hasil kontur dan permukaan respon memperlihatkan bahwa *yield bio-char* cenderung optimum pada kondisi suhu rendah (≈ 400 °C), kadar katalis tinggi (5–6% b/b), dan loading logam sekitar 3% b/b. Pada kondisi ini, prediksi model memberikan *yield* tertinggi mendekati 37%, yang sesuai dengan hasil eksperimen pada kombinasi 400 °C, 6% katalis, dan 2–3% logam. Pola ini konsisten dengan teori pirolisis katalitik, di mana suhu tinggi (>450 °C) mempercepat devolatilisasi sehingga menurunkan *yield* padatan (Lehmann & Joseph, 2015). Efek positif dari loading logam Ni/Mo juga terlihat jelas. Dalam plot permukaan, peningkatan logam dari 0 hingga 3% menyebabkan kenaikan *yield* signifikan, namun setelah melewati titik optimum, pengaruhnya melandai. Hal ini sejalan dengan laporan Chee dkk. (2023) bahwa katalis berbasis Ni pada biomassa sawit menunjukkan adanya titik optimum metal loading; dosis berlebih justru mendorong *cracking* sekunder sehingga produk bergeser ke fraksi gas atau *bio-oil*.

Nilai *desirability* yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh kompleksitas komponen, kisaran yang digunakan dalam komponen, jumlah komponen, respon dan target yang ingin dicapai dalam memperoleh formula optimum. Jumlah komponen dan respon juga mempengaruhi nilai *desirability*. Semakin banyak jumlah komponen dan respon, semakin sulit untuk mencapai keadaan optimum sehingga *desirability* yang dihasilkan kemungkinan rendah. Nilai masing-masing respon memiliki target yang berbeda sesuai dengan keinginan. Semakin besar tingkat kepentingan (*importance*) maka semakin sulit memperoleh formula optimum dengan *desirability* yang tinggi (Engelen, 2015). Pengujian menggunakan fitur *Optimize Response* pada Minitab, dengan parameter *confidence interval* (CI): 95%, *Prediction Interval* (PI): 95%, & Menggunakan model *Quadratic*. Hasil *Optimize Response: Yield* Menggunakan Minitab V.22 dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Optimize Response: Yield Bio-char Menggunakan Minitab V.22

Hasil optimasi diperoleh pada T 400 °C, Katalis 6%, Loading Logam 2.91% dimana *Confidence Limit (Cl)* = 95%, *Prediction Interval (PI)* = 95%, Dengan hasil prediksi: *Yield*: 36.82%, *Desirability (D)*= 0.979, dimana $D \approx 1.000$: Kondisi optimal.

Hasil optimasi menunjukkan bahwa kondisi suhu rendah (400 °C) dengan katalis maksimum (6%) dan loading logam mendekati 3 adalah kondisi terbaik untuk memaksimalkan *yield bio-char*. Pola ini konsisten dengan literatur ilmiah bahwa suhu tinggi menurunkan *yield bio-char* dan bahwa katalis dan logam perlu dioptimasi untuk menghindari saturasi atau pengaruh *over-cracking* (Chee dkk, 2019). *Desirability* yang tinggi (0.9791) menunjukkan bahwa model prediksi cukup andal dalam menyesuaikan variabel untuk tujuan tersebut.

4. KESIMPULAN

Berdasar hasil penelitian dan pembahasan maka dapat disimpulkan bahwa kondisi suhu rendah (400 °C) dengan katalis maksimum (6%) dan loading logam mendekati 3 adalah kondisi terbaik untuk memaksimalkan *yield bio-char*. Validasi eksperimen menunjukkan deviasi relatif <5% dari model. Karakterisasi katalis/*bio-char* mendukung bahwa peningkatan aktivitas katalis dikaitkan dengan struktur Ni/MoO₃ aktif dan morfologi *bio-char* berpori. Implikasi praktis: *bio-char* memiliki kualitas potensial untuk aplikasi adsorben (*iodine number*, *MB value*), amandemen tanah (pH, EC), serta material fungsional lain. Penelitian ini juga menekankan aspek keselamatan proses (pengendalian suhu tinggi, tekanan H₂ 10 bar, dan penggunaan gas *inert*) untuk memastikan eksperimen aman.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., & Ok, Y. S. (2020). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Bahri, S., Saputra, E., Herman, S., Muhdarina, & Marita, E. (2024). Sintesis dan karakterisasi katalis nikel zeolit alam Ni/NZA. *Journal of the Bioprocess, Chemical, and*

- Environmental Engineering Science*, 5(1).
<https://jbchees.ejournal.unri.ac.id/index.php/jbchees>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Chee, J. M., et al. (2023). Catalytic pyrolysis of palm kernel shell: Effect of temperature and catalyst dosage on biochar and bio-oil yield. *Renewable Energy*, 206, 1324–1332. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.043>
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2019). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 34(12), 2466–2486. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.003>
- Ferreira, S., & Patiño, D. (2015). Optimization of biochar production through pyrolysis of biomass using response surface methodology. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 115, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.08.012>
- Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia. (2022). *Akselerasi net zero emissions, Indonesia deklarasikan target terbaru penurunan emisi karbon*. <https://ekon.go.id/publikasi/detail/4652/akselerasi-net-zero-emissions-indonesia-deklarasikan-target-terbaru-penurunan-emisi-karbon>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., ... Pan, G. (2021). Soil organic carbon sequestration after biochar application: A global meta-analysis. *Agronomy*, 11(12), 2474. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122474>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Palm Oil Agribusiness Strategic Policy Institute (PASPI). (2024). *Kegunaan cangkang sawit & studi kasus*. <https://palmoilina.asia/sawit-hub/kegunaan-cangkang-sawit/>
- Serevina, V., Pambudi, R. D., Nugroho, D. A., Program Fisika, S., Fisika, P., Matematika, F., Ilmu, D., & Alam, P. (2021). Pelatihan pemanfaatan limbah gergaji dan cangkang telur ayam untuk membuka usaha briket biomassa. *Jurnal Pemberdayaan Masyarakat Sains (SAINS)*, 1(11). <https://doi.org/10.21009/jpm-sains.v1i1.18748>
- Shen, Y., Zhao, P., Shao, Q., Takahashi, F., & Yoshikawa, K. (2015). In-situ catalytic upgrading of bio-oil produced from rice husk pyrolysis using rice husk char-supported nickel catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 289–304. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.183>
- Shrestha, R. K., Jacinthe, P. A., Lal, R., Lorenz, K., Singh, M. P., ... Ren, W. (2023). Biochar as a negative emission technology: A synthesis of field research on greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Quality*, 52(4), 769–798. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20475>
- Sun, W., Yan, Y., Wei, Y., Ma, J., Niu, Z., & Hu, G. (2025). Catalytic pyrolysis of biomass: A review of zeolite, carbonaceous, and metal oxide catalysts. *Nanomaterials*, 15(7), 493. <https://doi.org/10.3390/nano15070493>
- U.S. Energy Information Administration. (2023). *International energy outlook 2023 – U.S. Energy Information Administration*. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>
- Wang, S., Guo, X., Wang, K., & Luo, Z. (2016). Influence of pyrolysis temperature on structure and oil production from sawdust pyrolysis. *Energy & Fuels*, 30(12), 10563–10569. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01607>
- Zhang, X., Lei, H., Zhu, L., Zhao, C., Wu, J., & Chen, S. (2017). Catalytic upgrading of bio-oil using Ni/HZSM-5 in supercritical ethanol. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.014>

Zhang, Y., Liu, C., Lin, Q., & Lal, R. (2021). Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 771, 145594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145594>