

Pemodelan dan Optimasi Pengaruh Variasi Suhu Pirolisis Lambat terhadap *Yield* dan Nilai Kalor *Biochar* Tongkol Jagung

Zakiah Darajat¹, Mimin Septiani², Arifah Sukasri³, Maria Assumpta Nogo Ole⁴

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Ujung Pandang^{1,2,3,4}

zakiah.darajat@poliupg.ac.id¹, miminseptiani@poliupg.ac.id², arifahsukasri@poliupg.ac.id³, maria.ole@poliupg.ac.id⁴

Corresponding Author: Zakiah Darajat, E-mail: zakiah.darajat@poliupg.ac.id

ABSTRACT

Biochar is a solid product derived from biomass pyrolysis with considerable potential as an alternative energy source and functional material. One of the key parameters influencing biochar characteristics is pyrolysis temperature. This study aims to model and optimize the effect of slow pyrolysis temperature variations on the yield and calorific value of biochar produced from corn cob feedstock. The pyrolysis process was conducted using a slow pyrolysis method at temperatures of 350, 400, 450, and 490 °C, with a low heating rate and a residence time of 60 minutes. The resulting biochar was characterized through proximate analysis, while its calorific value was determined using a bomb calorimeter. The relationship between pyrolysis temperature and both yield and calorific value was modeled using polynomial regression. Multi-response optimization was subsequently performed using the desirability function approach. The results indicate that increasing the pyrolysis temperature leads to a reduction in biochar yield, while simultaneously increasing fixed carbon content and stabilizing the calorific value at higher temperatures. The regression model demonstrated strong agreement with the experimental data, with a coefficient of determination (R^2) of 0.9582, indicating excellent model fit. Multi-response optimization revealed that the optimal pyrolysis temperature was 350 °C, producing a biochar yield of 79.71% and a calorific value of 7050 cal/g. This study provides a scientific basis for determining optimal slow pyrolysis operating conditions to enhance the valorization of corn cob waste as a biochar-based renewable energy resource.

KEYWORDS

Biochar, calorific value, pyrolysis, corn cob, Yield

ARTICLE DOI:

<https://doi.org/10.53696/venn.v5i2.418>

A. Pendahuluan

Keterbatasan ketersediaan energi fosil serta meningkatnya dampak negatif terhadap lingkungan mendorong upaya pengembangan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi untuk dikembangkan adalah biomassa ([Kurniawan & Abidin, 2025](#)). Keuntungan dari pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi adalah bahwa CO₂ yang dihasilkan berasal dari siklus karbon alami, sehingga tidak dikategorikan sebagai emisi gas rumah kaca bersih, karena jumlah CO₂ yang dilepaskan sebanding dengan CO₂ yang telah diserap dari atmosfer selama pertumbuhan dan siklus hidup biomassa tersebut ([Domazetovska et al., 2023](#)). Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang memiliki prospek besar untuk dikembangkan sebagai solusi pemenuhan kebutuhan energi dunia. Biomassa berasal dari material organik hasil proses fotosintesis, seperti limbah pertanian, residu kegiatan industri, serta berbagai jenis bahan organik lainnya ([Addriani et al., 2024](#)).

Di Indonesia, terutama di wilayah Sulawesi Selatan, produksi jagung tercatat sebesar 1,13 juta ton ([Badan Pusat Statistik, 2025](#)). Tingginya produksi padi dan jagung berkontribusi terhadap terbentuknya limbah pertanian dalam jumlah besar. Salah satu limbah biomassa dari produksi jagung tersebut adalah tongkol jagung. Tongkol jagung merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pemipilan jagung. Tongkol jagung menyumbang sekitar 18% dari total produksi jagung. Residu

tanaman jagung tersebut umumnya dibiarkan di lahan atau dibakar untuk memperbaiki kondisi tanah pada musim tanam berikutnya ([Christian et al., 2021](#)). Kondisi tersebut menunjukkan pemanfaatan yang belum maksimal, mengingat tongkol jagung merupakan bahan setengah jadi yang masih dapat diolah lebih lanjut menjadi berbagai produk dengan nilai jual yang lebih tinggi ([Sabrina et al., 2025](#)).

Senyawa penyusun tongkol jagung didominasi oleh makromolekul berupa selulosa, hemiselulosa, serta lignin yang merupakan polimer aromatik yang berperan dalam memberikan kekuatan dan kestabilan struktur. Hasil analisa laboratorium terhadap kandungan Selulosa, Hemiselulosa, dan Lignin pada komponen jerami jagung dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada komponen Jerami jagung

Parameter yang diamati	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)
Batang	26,4310 ± 0,02	33,0288 ± 0,02	10,5759 ± 0,01
Daun	24,1592 ± 0,03	29,6194 ± 0,02	7,2935 ± 0,01
Tongkol	23,2025 ± 0,06	38,0652 ± 0,03	13,4734 ± 0,08
Kelobot	33,4497 ± 0,02	35,1541 ± 0,05	5,6198 ± 0,01
Rata-rata	26,8106 ± 4,62	33,9669 ± 3,55	9,2406 ± 3,49

Sumber: ([Fitriana, 2024](#))

Tingginya kandungan selulosa menjadikan tongkol jagung sebagai bahan yang potensial untuk menghasilkan *biochar* dengan kadar karbon terikat yang tinggi, struktur pori yang baik, serta kemampuan dalam meningkatkan pH tanah. Hemiselulosa relatif mudah terurai selama proses pirolisis dan cenderung menghasilkan senyawa volatil serta tar, sedangkan lignin memiliki ketahanan termal yang lebih tinggi sehingga berperan penting dalam pembentukan karbon terikat pada *biochar*. ([Sukmawati et al., 2025](#)). Dengan kandungan tersebut, produk samping jagung diklasifikasikan sebagai biomassa lignoselulosa, yang dikenal sebagai salah satu bahan baku utama dalam pembuatan *biochar*. Bahan ini memiliki potensi untuk ditingkatkan nilai ekonominya melalui pemanfaatan yang lebih optimal, salah satunya dengan mengolahnya menjadi *biochar* ([Cardoso et al., 2025](#)). *Biochar* adalah material hasil konversi limbah biomassa, terutama dari sektor pertanian, melalui proses pemanasan pada kondisi minim oksigen atau tanpa keberadaan udara sama sekali. Proses konversi tersebut dikenal sebagai pirolisis (*pyrolysis*) ([Bawamenewi et al., 2025](#)). Pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia bahan organik melalui pemanasan pada suhu tinggi, umumnya berkisar antara 300–700 °C, dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan suplai oksigen yang sangat terbatas. Melalui proses ini, berbagai jenis limbah organik, seperti limbah pertanian, kehutanan, pangan, dan peternakan, dapat dikonversi menjadi tiga produk utama yang memiliki nilai guna, yaitu *biochar* (fase padat), *syngas* (fase gas), dan *bio-oil* (fase cair) ([Masrida & Kartika, 2025](#)).

Suhu pirolisis berperan penting dalam menentukan hasil *biochar* yang diperoleh. *Biochar* yang diproduksi pada variasi suhu pirolisis menunjukkan tingkat karbonisasi yang berbeda. Selain itu, perubahan suhu pirolisis dapat memengaruhi karakteristik permukaan *biochar*, termasuk kekasaran, mikromorfologi, serta struktur porinya ([Zhang et al., 2019b](#)). Dalam konteks pemanfaatan energi, nilai kalor merupakan parameter penting yang mencerminkan densitas energi *biochar* sebagai bahan bakar padat. Nilai kalor dipengaruhi oleh suhu pirolisis yang menentukan tingkat karbonisasi biomassa. Peningkatan suhu pirolisis umumnya menurunkan fraksi volatil dan meningkatkan kandungan karbon terikat serta struktur aromatik, sehingga berkontribusi terhadap kenaikan nilai kalor *biochar* (01). Metode pirolisis yang telah berkembang diklasifikasikan menjadi pirolisis lambat, cepat, dan kilat. Pirolisis lambat berlangsung pada laju pemanasan rendah (< 20 °C/menit) dengan waktu tinggal yang lama (> 1 jam) pada suhu 300–700 °C, dan terutama menghasilkan *biochar*.

Pirolisis cepat menggunakan laju pemanasan tinggi ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{menit}$) serta waktu tinggal yang singkat ($< 10\text{ menit}$) pada suhu $400\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan fokus utama pada produksi *bio-oil*. Sementara itu, pirolisis kilat melibatkan laju pemanasan yang sangat tinggi ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{detik}$) pada suhu $900\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang memerlukan ukuran partikel bahan baku yang lebih kecil untuk mencapai proses yang efisien (Loc et al., 2025). Biochar tongkol jagung dengan rendemen sebesar 46,8% dan rasio H/C sebesar 0,305 mengindikasikan tingkat kestabilan yang tinggi, sehingga *biochar* tersebut berpotensi efektif dalam mendukung sekuestrasi karbon (Selvam S. et al., 2021).

Pirolisis lambat menghasilkan jumlah *biochar* berkualitas tinggi paling besar dibandingkan dengan proses lainnya. Pada pirolisis lambat, uap yang terbentuk terperangkap dan bereaksi secara intensif dengan fase padat, sehingga pada akhirnya menghasilkan rendemen arang yang tinggi. Meskipun pirolisis cepat juga dapat digunakan dalam produksi *biochar*, metode ini lebih umum diterapkan untuk menghasilkan *bio-oil*, dengan *bio-oil* sebagai produk utama dan *biochar* sebagai produk samping (Awad et al., 2024).

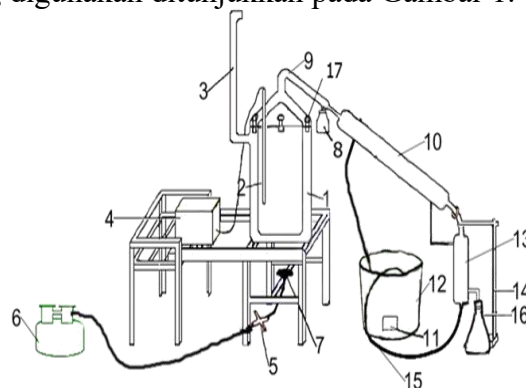
Berdasarkan uraian tersebut, pemanfaatan limbah tongkol jagung sebagai bahan baku *biochar* melalui proses pirolisis lambat menjadi alternatif yang potensial untuk meningkatkan nilai tambah limbah pertanian sekaligus mendukung pengembangan energi terbarukan. Variasi suhu pirolisis diketahui berperan penting dalam menentukan rendemen serta karakteristik *biochar*, khususnya nilai kalor yang berhubungan langsung dengan potensi pemanfaatannya sebagai sumber energi. Sebagian besar penelitian sebelumnya masih bersifat eksperimental deskriptif dan belum banyak mengembangkan model kuantitatif untuk memprediksi hubungan suhu pirolisis dengan yield dan nilai kalor *biochar*. Padahal, pendekatan pemodelan matematis penting untuk analisis prediktif dan penentuan kondisi operasi optimum. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan model polinomial hubungan suhu pirolisis lambat terhadap yield dan nilai kalor *biochar* tongkol jagung serta melakukan optimasi menggunakan metode desirability untuk memperoleh kondisi operasi terbaik

B. Metodologi

1. Bahan dan Alat

Bahan baku yang digunakan berupa limbah biomassa tongkol jagung hibrida yang diperoleh dari Balai Penelitian Tanaman Serelia Kabupaten Maros serta dari petani di Kabupaten Bone, Sulawesi Selatan.

Sistem pirolisis menggunakan reaktor *batch* skala laboratorium yang dirancang dan dirakit secara mandiri. Rangkaian alat terdiri atas reaktor pirolisis, sistem pengontrol suhu, dan unit kondensasi yang berfungsi untuk mendinginkan dan mengumpulkan produk cair hasil pirolisis. Rangkaian alat pirolisis yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Alat Pirolisis

Keterangan Gambar:

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1) Reaktor pirolisis | 10) Kondensor |
| 2) Pipa pengontrol suhu | 11) Pompa |
| 3) Pipa cerobong pengeluaran asap | 12) <i>Water Tank</i> |
| 4) <i>Termocople</i> | 13) Katup |
| 5) Pengontrol nyala api | 14) Tiang Penyangga |
| 6) Tabung gas | 15) Selang |
| 7) Tungku pembakaran | 16) Penampung asap cair |
| 8) Penampung tar | 17) Sekrup |
| 9) Penutup reactor pirolisis | |

2. *Prosedur Penelitian*

1) Persiapan Bahan Baku

Tongkol jagung dibersihkan dari kotoran yang menempel, kemudian dikeringkan dengan cara penjemuran di bawah sinar matahari langsung selama tiga hari. Setelah kering, bahan dicacah dan diayak hingga diperoleh ukuran partikel $-3/8/+1$ inch.

2) Proses Pirolisis

Tongkol jagung berukuran sedang ($-3/8/+1$ inci) sebanyak 1 kg dipirolisis pada variasi suhu 350 °C, 400 °C, 450 °C, dan 490 °C, dengan waktu penahanan (*holding time*) selama 60 menit. *Biochar* yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan karakteristik proksimat dan nilai kalor.

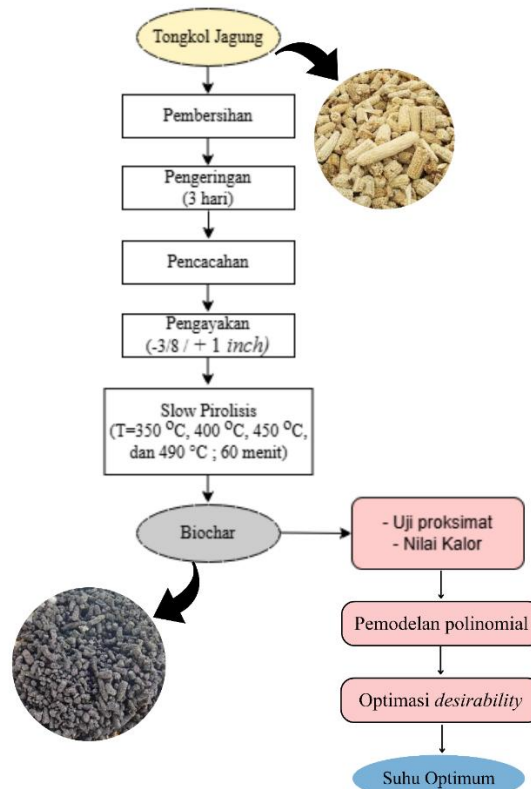
3) Analisis *Biochar*

Karakterisasi *biochar* dilakukan melalui analisis proksimat yang meliputi kadar air (%MAS), kadar abu (%Ash), zat terbang (%VM), karbon terikat (%FC), serta kandungan sulfur. Pengukuran nilai kalor *biochar* tongkol jagung dilakukan menggunakan alat *bomb calorimeter*.

4) Pemodelan dan optimasi

Data hasil eksperimen digunakan untuk membangun model matematis hubungan antara suhu pirolisis dengan yield dan nilai kalor biochar menggunakan pendekatan regresi polinomial. Pemodelan dilakukan dengan menyesuaikan data eksperimen terhadap persamaan polinomial orde dua untuk memperoleh hubungan fungsional antara variabel suhu sebagai variabel bebas dan parameter respon sebagai variabel terikat. Kesesuaian model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2) untuk menilai kemampuan model dalam merepresentasikan data eksperimen.

Model yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk optimasi kondisi operasi menggunakan metode *desirability*. Metode ini mengubah setiap respon menjadi fungsi *desirability* dengan rentang nilai 0–1, di mana nilai mendekati 1 menunjukkan kondisi yang paling diinginkan. Optimasi dilakukan secara simultan terhadap *yield* dan nilai kalor untuk menentukan kombinasi suhu pirolisis yang memberikan kinerja optimum.

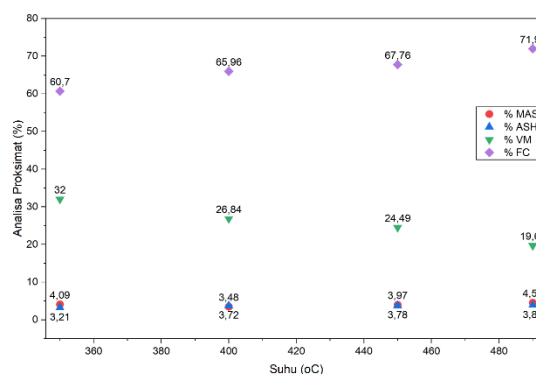


Gambar 2. Diagram alir pirolisis tongkol jagung menjadi *biochar*

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Pengaruh Suhu terhadap Analisa Proksimat Biochar

Karakterisasi *biochar* dilakukan melalui analisis proksimat untuk mengevaluasi perubahan komposisi kimia akibat variasi suhu pirolisis. Gambar 3 menunjukkan perubahan komposisi proksimat *biochar* tongkol jagung yang dihasilkan melalui proses pirolisis lambat pada rentang suhu 350–490 °C, meliputi kadar air (*moisture*), kadar abu (*ash*), zat terbang (*volatile matter*), dan karbon terikat (*fixed carbon*).



Gambar 3. Pengaruh suhu terhadap hasil analisa proksimat *biochar* tongkol jagung

1) Kadar Air (*Moisture Content* - %MAS)

Kadar air *biochar* berada pada rentang 3,48–4,53% dan relatif rendah pada seluruh variasi suhu. Secara umum, kadar air *biochar* menurun atau tetap rendah pada suhu pirolisis yang lebih tinggi

karena energi panas yang lebih besar memfasilitasi evaporasi air dan devolatilisasi senyawa ringan dalam biomassa. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis menyebabkan penurunan moisture karena pelepasan uap air yang lebih intens saat suhu meningkat, yang mencerminkan peningkatan tingkat karbonisasi biochar di suhu yang lebih tinggi. Penurunan moisture ini juga meningkatkan stabilitas penyimpanan dan karakteristik energi *biochar* sebagai bahan bakar padat ([Sathyabama & Firdous, 2025](#)).

2) Kadar Abu (*Ash Content* - % ASH)

Kadar abu biochar menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan kenaikan suhu pirolisis, dari sekitar 3,21% pada suhu rendah menjadi 3,84% pada suhu tertinggi. Peningkatan kadar abu ini terjadi karena fraksi organik biomassa mengalami degradasi dan volatilisasi yang lebih intens pada suhu tinggi, sehingga komponen mineral anorganik menjadi lebih terkonsentrasi dalam residu padat. Pola tersebut menunjukkan keseragaman pada biochar yang diproduksi dari beragam limbah pertanian dan sumber biomassa lainnya, di mana peningkatan suhu pirolisis mendorong pelepasan komponen organik secara lebih intensif, sementara fraksi mineral tetap tertinggal dan terakumulasi dalam residu padat ([Khater et al., 2024](#)).

3) Zat Terbang (*Volatile Matter* - %VM)

Kadar zat terbang mengalami penurunan yang signifikan dengan meningkatnya suhu pirolisis, dari sekitar 32% pada suhu terendah menjadi 19,68% pada suhu tertinggi. Penurunan *volatile matter* ini mengindikasikan terjadinya proses devolatilisasi yang semakin dominan akibat terputusnya ikatan senyawa organik ringan, seperti hidrokarbon, tar, dan gas, pada kondisi suhu yang lebih tinggi. Penurunan kadar zat terbang merupakan indikator terjadinya karbonisasi yang lebih sempurna selama proses pirolisis lambat ([Borges et al., 2026](#)).

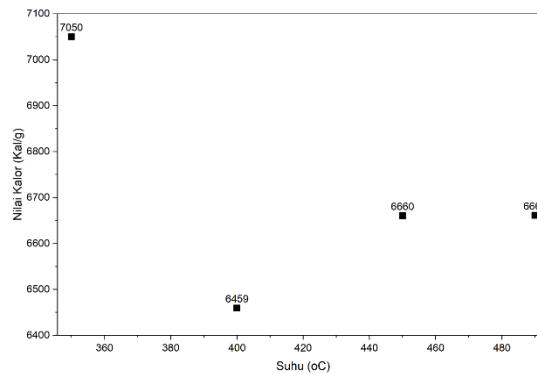
4) Karbon terikat (*Fixed Carbon* - % FC)

Sebaliknya, kadar karbon terikat menunjukkan peningkatan yang jelas seiring dengan kenaikan suhu pirolisis, dari 60,7% menjadi 71,95%. Peningkatan *fixed carbon* ini berkaitan erat dengan menurunnya kadar zat terbang dan meningkatnya derajat aromatisasi struktur karbon pada biochar. Biochar dengan kadar karbon terikat tinggi umumnya memiliki stabilitas termal yang lebih baik dan nilai kalor yang lebih tinggi, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi sebagai bahan bakar padat atau aditif briket ([Tarelho et al., 2024](#)).

Tren perubahan komposisi proksimat ini dapat dijelaskan secara termokimia: pada suhu pirolisis yang lebih tinggi, reaksi dehidratasi, devolatilisasi, dan dekomposisi termal (*thermal cracking*) berlangsung lebih intens sehingga meningkatkan pelepasan uap air dan *volatile matter*, sementara residu karbon yang lebih stabil (*fixed carbon*) dan komponen mineral (*ash*) menjadi lebih dominan dalam *biochar* ([Sathyabama & Firdous, 2025](#)). Penurunan volatile matter juga menunjukkan bahwa struktur karbon biochar menjadi lebih aromatik dan terkonsentrasi, yang umumnya dikaitkan dengan pemberian nilai energi dan stabilitas termal yang lebih tinggi dalam karakter biochar (Borges et al., 2026).

2. Pengaruh Suhu Terhadap Nilai Kalor Biochar

Nilai kalor biochar dianalisis untuk mengevaluasi potensi energinya sebagai bahan bakar padat. Pengaruh suhu terhadap nilai kalor biochar ditunjukkan pada Gambar 4.



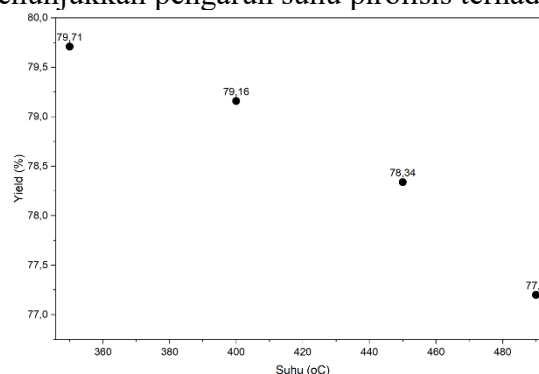
Gambar 4. Pengaruh suhu terhadap nilai kalor *biochar* tongkol jagung

Nilai kalor *biochar* tongkol jagung menunjukkan pola yang tidak linier terhadap peningkatan suhu pirolisis. Nilai kalor relatif tinggi pada suhu 350 °C, kemudian menurun pada suhu 400 °C, dan kembali meningkat serta stabil pada suhu lebih tinggi 450–490 °C. Pola ini berkaitan dengan perubahan mekanisme termokimia selama pirolisis lambat. Pada suhu 400 °C, pelepasan fraksi volatil seperti tar dan gas ringan berlangsung lebih dominan, sehingga mengurangi kontribusi senyawa organik berenergi terhadap residu padat dan menyebabkan penurunan nilai kalor. Fenomena ini sejalan dengan laporan bahwa devolatilisasi awal dapat menurunkan *higher heating value* *biochar* akibat hilangnya senyawa volatil yang masih memiliki kandungan energi signifikan ([Wijitkosum, 2023](#)).

Seiring peningkatan suhu, proses karbonisasi menjadi lebih dominan, ditandai dengan peningkatan fraksi karbon terikat dan pembentukan struktur karbon yang lebih aromatik dan stabil. Kondisi ini berkontribusi pada peningkatan dan stabilisasi nilai kalor *biochar* pada suhu tinggi. Tren serupa dilaporkan pada berbagai *biochar* berbasis limbah pertanian, di mana suhu pirolisis yang lebih tinggi menghasilkan *biochar* dengan kualitas energi yang lebih baik akibat pengayaan karbon terikat ([Borges et al., 2026](#)). Dengan demikian, variasi suhu pirolisis berperan penting dalam menentukan kualitas energi *biochar*, di mana suhu tinggi cenderung menghasilkan *biochar* dengan karakteristik energi yang lebih stabil dan sesuai untuk aplikasi bahan bakar padat ([Zhang et al., 2019b](#)).

3. Pengaruh Suhu Terhadap Yield Biochar

Yield *biochar* dianalisis untuk mengevaluasi efisiensi konversi biomassa selama proses pirolisis. Gambar 5 menunjukkan pengaruh suhu pirolisis terhadap yield *biochar*



Gambar 5. Pengaruh suhu terhadap % yield *biochar* tongkol jagung

Data menunjukkan bahwa *yield biochar* tongkol jagung mengalami penurunan bertahap seiring dengan peningkatan suhu pirolisis dari sekitar 350 °C hingga 490 °C. Pada suhu rendah (~350 °C), *yield* tertinggi dicapai sekitar 79,71 %, kemudian menurun menjadi 79,16 % pada ~400 °C, 78,34 %

pada ~450 °C, dan 77,20 % pada ~490 °C. Tren penurunan *yield* ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu pirolisis mendukung devolatilisasi dan pelepasan komponen volatil yang lebih intens, sehingga residu padat (*biochar*) yang tersisa semakin berkurang seiring bertambahnya suhu operasi.

Secara termokimia, selama pirolisis, biomassa mengalami pemecahan molekul organik kompleks menjadi fraksi volatil (gas dan *bio-oil*) dan residu padat. Pada suhu yang lebih tinggi, kinetika reaksi termik memfasilitasi pelepasan komponen volatil dengan lebih efektif, yang mengakibatkan peningkatan proporsi produk gas/*bio-oil* dan penurunan proporsi residu *biochar*. Fenomena ini sejalan dengan penelitian pirolisis lambat pada berbagai biomassa, yang melaporkan bahwa peningkatan suhu cenderung menurunkan *solid yield* karena volatil matter dilepaskan lebih cepat dan efisien pada suhu tinggi dibandingkan pada suhu rendah (Kumar et al., 2024).

Selain itu, penurunan *yield* pada suhu tinggi dapat dihubungkan dengan peningkatan intensitas reaksi dekomposisi termal, termasuk dekarboksilasi, dehidratasi, dan *cracking*, yang mempercepat hilangnya senyawa organik ringan serta memperbesar fraksi produk *volatile* (Zhang et al., 2019a).

4. Pemodelan dan Optimasi

Setiap jenis bahan baku diuji pada berbagai suhu, dan sifat *biochar* dimodelkan dengan regresi polinomial sebagai fungsi suhu pirolisis maksimum dan komponen penting biomassa. Untuk mengoptimalkan beberapa sifat sekaligus, digunakan optimasi multirespon dengan metode *desirability*, di mana fungsi *composite desirability* (D) menggabungkan *desirability* tiap respon menjadi satu nilai skalar (Derringer & Suich, 2018)

Pengaruh suhu pirolisis terhadap *yield* *biochar* dan nilai kalor dimodelkan menggunakan regresi polinomial:

- 1) *Yield* *biochar* dimodelkan dengan regresi linear (orde 1). Hasil fit memberikan $R^2 = 0,9582$, menunjukkan bahwa model linear sangat baik dalam menjelaskan variasi data *yield*. Persamaan linear yang diperoleh:

$$Y_{yield}(T) = aT + b \quad (1)$$

Prediksi model berada dalam rentang 77,42–79,88 %, konsisten dengan data eksperimen (77,2–79,7 %).

- 2) Nilai kalor dimodelkan dengan polinomial orde dua, dengan $R^2 = 0,7746$, menangkap tren nonlinier terhadap suhu. Rentang prediksi nilai kalor model adalah 6517–7009 cal/g, sesuai dengan data eksperimen.
- 3) Perhitungan *Desirability*

Untuk optimasi multirespon digunakan metode *desirability*.

Desirability individu dihitung sebagai:

$$d_{yield}(T) = \frac{Y_{yield}(T) - L_{yield}}{H_{yield} - L_{yield}} \quad (2)$$

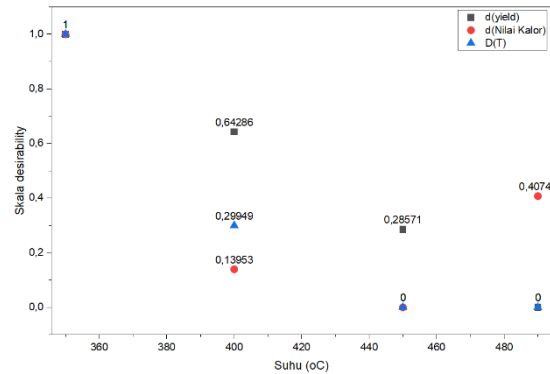
$$d_{Nilai\ kalor}(T) = \frac{Y_{nilai\ kalor}(T) - L_{nilai\ kalor}}{H_{nilai\ kalor} - L_{nilai\ kalor}} \quad (3)$$

dengan *L* dan *H* masing-masing nilai minimum dan maksimum dari model.

Composite desirability dihitung sebagai rata-rata geometrik:

$$D(T) = \sqrt{d_{yield}(T) \times d_{nilai\ kalor}(T)} \quad (4)$$

Hasilnya menunjukkan Skala *desirability* (D maksimum) = 1 pada $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga suhu pirolisis optimum untuk kombinasi tertinggi antara *yield* dan Nilai Kalor adalah $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hasil tersebut dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Pengaruh variasi suhu terhadap *desirability*: Analisis kurva optimasi

D. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Variasi suhu pirolisis lambat berpengaruh terhadap *yield* dan nilai kalor *biochar* tongkol jagung. Peningkatan suhu pirolisis menyebabkan penurunan *yield* akibat meningkatnya devolatilisasi, sementara kualitas energi *biochar* meningkat seiring bertambahnya kadar karbon terikat. Pemodelan dan optimasi multirespon menunjukkan bahwa suhu pirolisis $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ merupakan kondisi optimum untuk menghasilkan kombinasi *yield* dan nilai kalor yang paling menguntungkan. Suhu optimum $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ yang diperoleh dari hasil optimasi tidak menunjukkan nilai kalor tertinggi, tetapi merupakan titik kompromi terbaik antara *yield* dan kualitas energi *biochar*. Pada suhu yang lebih tinggi, nilai kalor memang meningkat akibat bertambahnya kadar karbon terikat dan penurunan fraksi volatil. Namun, peningkatan suhu juga menyebabkan penurunan *yield* yang signifikan karena devolatilisasi yang lebih intensif. Metode optimasi multirespon berbasis *desirability* mempertimbangkan kedua parameter tersebut secara simultan, sehingga suhu $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ dipilih sebagai kondisi operasi yang menghasilkan keseimbangan paling menguntungkan antara kuantitas dan kualitas *biochar*.

Daftar Pustaka

- Addriani, R., Hamdi, H., & Razi, P. (2024). Systematic Literature Review : Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8 Nomor 3, 47482–47490.
- Awad, M. I., Makkawi, Y., & Hassan, N. M. (2024). Yield and Energy Modeling for *Biochar* and Bio-Oil Using Pyrolysis Temperature and Biomass Constituents. *ACS Omega*, 9, 18654–18667. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01646>
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Luas Panen Dan Produksi Jagung Di Indonesia 2024* (Vol. 2).
- Bawamenewi, T. A., Gea, F. H., & Waruwu, S. (2025). Penggunaan *Biochar* untuk Meningkatkan Kualitas Tanah pada Sistem Pertanian Berkelanjutan. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2 (1)(12), 179–187. <https://doi.org/https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.257>
- Borges, A. D. S., Cardoso, M., & Oliveira, M. (2026). Thermochemical evaluation of *biochars*

- properties from Portuguese agro-forestry residues for solid fuel applications. *Scientific Reports*, 16, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-30809-5> 1
- Cardoso, S., Pereira-coelho, M., Luiz, F., & Vitali, L. (2025). Green Analytical Chemistry Corn cob-derived *biochar* as a biosorbent for endocrine disrupting compounds in dispersive pipette extraction. *Green Analytical Chemistry*, 13(March), 100251. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2025.100251>
- Christian, J., Quillope, C., Carpio, R. B., Gatdula, K. M., Concepcion, M., Detras, M., & Doliente, S. S. (2021). Optimization of process parameters of self-purging microwave pyrolysis of corn cob for *biochar* production. *Heliyon*, 7(11), e08417. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08417>
- Derringer, G., & Suich, R. (2018). Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Domazetovska, S., Strezov, V., Filkoski, R. V., & Kan, T. (2023). Exploring the Potential of Biomass Pyrolysis for Renewable and Sustainable Energy Production: A Comparative Study of Corn Cob, Vine Rod, and Sunflower. *Journal Sustainability*, 15(September), 13552. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su151813552> Academic
- Fitriana, D. (2024). Analisis Kandungan Selulosa, Hemiselulosa Dan Lignin Dalam Komponen Jerami Jagung (Batang, Daun, Tongkol, Dan Kelobot). *Jurnal Sains Dan Teknologi Lichen Institut*, 1(1), 45–55.
- Khater, E. S., Bahnasawy, A., Hamouda, R., Sabahy, A., Abbas, W., & Morsy, O. M. (2024). *Biochar* production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14, 2045–2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52336-5>
- Kumar, K., Suresh, B., Nataraj, M., Tayappa, M., Vyas, Y., Kumar, R., & Acharya, B. (2024). Materials Science for Energy Technologies Production of *biochar* from waste biomass using slow pyrolysis : Studies of the effect of pyrolysis temperature and holding time on *biochar* yield and properties. *Materials Science for Energy Technologies*, 7(May), 318–334. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2024.05.002>
- Kurniawan, B. D., & Abidin, A. (2025). Journal Of Applied Mechanical Engineering And Renewable Energy (Jamere) Pengaruh Variasi Suhu Pirolisis Terhadap Karakteristik Bio-Oil Dari Limbah Batang Tembakau Sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Journal Of Applied Mechanical Engineering And Renewable Energy (Jamere)*, 5(2), 83–87.
- Loc, N. X., Thi, D., & Phuong, M. (2025). Optimizing *biochar* production : a review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis. *Higher Education Press*, 12(1), 148–172. <https://doi.org/https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024597>
- Masrida, R., & Kartika, W. (2025). Potensi Konversi Limbah Organik dengan Metode Pirolisis Menjadi *Biochar* , Syngas dan Bio-Oil : Tinjauan Literatur Sistematis. *Journal of Engineering Environment Energy and Science*, 4(6), 79–88.
- Sabrina, N. F., Hasyim, H. F., Anam, K., & Amri, F. (2025). Pembuatan Briket Berbahan Dasar Tongkol Jagung Optimalisasi Pemanfaatan Limbah Jagung di Desa Sukarema sebagai Upaya. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 8 (1)(2), 89–94.

<https://doi.org/https://doi.org/10.29303/jpmppi.v8i1.10591>

- Sathyabama, K., & Firdous, S. (2025). Effect of Pyrolysis Temperature on the Physicochemical Properties and Structural Characteristics of Agricultural Wastes-Derived *Biochar*. *ACS Omega*, *10*, 37013–37024. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00120>
- Selvam S., M. S., Janakiraman, T., & Paramasivan, B. (2021). Characterization of engineered corn cob *biochar* produced in allothermal pyrolysis reactor. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.469>
- Sukmawati, S., Nita, A., Rahim, I., Suherman, S., Qadri, S. N., Zamzam, S., Noerfitryani, N., & MK, P. (2025). Karakteristik Pupuk Slow Release Berbasis *Biochar* Tongkol Jagung yang Diperkaya Nutrisi Characteristics of Slow release Fertilizer Based on Nutrient Enriched Corn Cob *Biochar*. *Jurnal Galung Tropika*, *14*(2), 212–223. <https://doi.org/https://doi.org/10.31850/jgt.v14i2.1370>
- Tarelho, L. A. C., Oliveira, H. S. M., Silva, F. G. C. S., Pio, D. T., & Matos, M. A. A. (2024). Valorisation of residual biomass by pyrolysis : in fl uence of process conditions on products. *Sustainable Energy & Fuels*, *8*, 379–396. <https://doi.org/10.1039/d3se01216f>
- Wijitkosum, S. (2023). Influence of Pyrolysis Temperature and Time on *Biochar* Properties and Its Potential for Climate Change Mitigation. *Journal of Human, Earth, and Future*, *4*(4), 472–485. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.28991/HEF-2023-04-04-07> ?
- Zhang, X., Zhang, P., Yuan, X., Li, Y., & Han, L. (2019a). Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue *biochar*. *Bioresource Technology*, 122318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122318>
- Zhang, X., Zhang, P., Yuan, X., Li, Y., & Han, L. (2019b). Effect of pyrolysis temperature on physicochemical characteristics of *biochar* derived from rapid pyrolysis of *Prosopis africana* biomass. *Bioresource Technology*, *17*(1), 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2506857>