

## SIMULASI NUMERIK VALIDASI MODEL PIROLISIS LAMBAT TANDAN KOSONG SAWIT UNTUK PREDIKSI YIELD BIOCHAR ASAP CAIR

### NUMERICAL SIMULATION AND MODEL VALIDATION OF OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCHES SLOW PYROLYSIS YIELD PREDICTION

Arina Fatharani\*, Yuwana Yuwana, Firmansyah Firmansyah, Evanila Silvia,  
Bosman Sidebang

Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu

\*email : arina.fatharani@unib.ac.id

ARTICLE HISTORY : Received [15 March 2026] Revised [17 June 2026] Accepted [ 27 June 2026]

#### ABSTRAK

**Tujuan :** Penelitian ini bertujuan untuk membangun dan memvalidasi model simulasi numerik pirolisis lambat Tandan Kosong Sawit (TKS) guna memprediksi yield biochar dan asap cair pada rentang suhu 400–600°C sebagai upaya optimalisasi pemanfaatan limbah industri sawit. **Metodologi :** Penelitian menggunakan pendekatan kinetika reaksi Arrhenius orde satu dengan energi aktivasi ( $E_a$ ) sebesar 87,49 kJ/mol. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data eksperimen dari literatur terbaru (tahun 2023–2025) menggunakan metrik evaluasi statistik RMSE, MAPE, dan  $R^2$ . **Hasil :** Model simulasi menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi dengan nilai RMSE 0,271%, MAPE 0,74%, dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) 0,9726 pada laju pemanasan 10°C/menit. Pada suhu operasional 450°C, model memprediksi yield biochar sebesar 30,7% dan estimasi asap cair sebesar 18,6%. **Temuan :** Model numerik ini mampu merepresentasikan proses degradasi termal TKS secara presisi, memungkinkan prediksi hasil produk tanpa harus selalu melalui pengujian laboratorium yang intensif. **Kebaruan :** Penggunaan basis data validasi dari literatur termutakhir (tiga tahun terakhir) serta penerapan spesifik pada model pirolisis lambat berbahan bakar gas untuk karakteristik TKS. **Originalitas :** Penelitian ini menawarkan integrasi simulasi kinetika dengan parameter desain alat pirolisis tertentu yang memberikan solusi praktis dalam memprediksi efisiensi konversi massa limbah menjadi produk bernilai tambah. **Kesimpulan :** Model yang dikembangkan valid dan reliabel untuk memprediksi hasil produk pirolisis TKS, sehingga dapat digunakan sebagai alat bantu dalam perancangan dan optimalisasi reaktor pirolisis skala kecil-menengah. **Jenis Paper :** Artikel Penelitian.

**Kata Kunci:** biochar; pirolisis lambat; simulasi numerik; tandan kosong sawit; validasi model.

#### ABSTRACT

**Purpose :** This study aims to develop and validate a numerical simulation model for Oil Palm Empty Fruit Bunches (EFB) slow pyrolysis to predict biochar and liquid smoke yields within the temperature range of 400–600°C for optimizing palm oil waste conversion. **Methodology :** The research utilizes a first-order Arrhenius reaction kinetics approach with an activation energy ( $E_a$ ) of 87.49 kJ/mol. Model validation was performed by comparing simulation results with experimental data from the latest literature (2023–2025) using RMSE, MAPE, and  $R^2$  statistical metrics. **Results :** The simulation model demonstrates very high accuracy with an RMSE of 0.271%, MAPE of 0.74%, and  $R^2$  of 0.9726 at a heating rate of 10°C/min. At an operating temperature of 450°C, the model predicts a biochar yield of 30.7% and an estimated



liquid smoke yield of 18.6%. **Findings** : The numerical model is proven capable of precisely representing the thermal degradation process of EFB, enabling product yield prediction without intensive laboratory testing. **Novelty** : The use of the most recent validation datasets (last three years) and specific application to a gas-fueled slow pyrolysis model tailored for EFB characteristics. **Originality** : This research offers an integrative approach between kinetic simulation and specific pyrolysis device parameters, providing a practical solution for predicting waste mass conversion efficiency into value-added products. **Conclusion** : The developed model is valid and reliable for predicting EFB pyrolysis product yields, serving as a technical tool for the design and optimization of small-to-medium-scale pyrolysis reactors. **Type of Paper**: Research Article.

**Keywords**: biochar; empty fruit bunch; model validation; numerical simulation; slow pyrolysis.

## PENDAHULUAN

Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar dunia menghasilkan limbah Tandan Kosong Sawit (TKS) mencapai 23% dari setiap ton Tandan Buah Segar (Wulandari et al., 2023; Yusuf et al., 2025). Pengelolaan TKS selama ini didominasi oleh penggunaan sebagai mulsa atau pembakaran terbuka, yang menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> signifikan (234,69–328,59 kg CO<sub>2</sub> eq/jam) serta berkontribusi pada asidifikasi dan eutrofikasi (Wulandari et al., 2023, 2024). Hal ini menjadikan pengelolaan TKS sebagai isu lingkungan yang mendesak.

TKS memiliki kandungan lignoselulosa tinggi yang berpotensi dikonversi menjadi produk bernilai tambah melalui pirolisis (Hardianto et al., 2023). Pirolisis TKS menghasilkan dua produk utama: (1) biochar sebagai pembenah tanah yang mampu mengurangi pupuk sintetis hingga 75,27% (Marhani et al., 2022; Setyawan et al., 2023; Yusuf et al., 2025); dan (2) asap cair yang mengandung senyawa fenolat serta asam organik untuk biopestisida dan pengawet alami (Janta-In et al., 2022; Surboyo et al., 2024).

Komponen lignoselulosa TKS berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin memiliki karakteristik dekomposisi termal berbeda, yaitu hemiselulosa terurai pada 220–315°C, selulosa pada 315–400°C, dan lignin secara bertahap hingga 900°C (Yang, 2007). Hemiselulosa dan selulosa menjadi sumber utama gas dan asap cair, sedangkan lignin berkontribusi dominan terhadap pembentukan biochar (Kan et al., 2016). Karakteristik proksimat TKS dengan *volatile matter* tinggi (71,91–74,0%) dan *fixed carbon* moderat (18,67–26,45%) mencerminkan potensi produksi asap cair sekaligus biochar (Ko et al., 2025; Setyawan et al., 2023).

Suhu pirolisis merupakan faktor paling krusial terhadap *yield* dan sifat produk. Suhu lebih tinggi meningkatkan kualitas biochar (kadar karbon tetap, luas permukaan spesifik) namun menurunkan *yield*-nya (Dhar et al., 2022; Tomczyk et al., 2020). Produksi asap cair optimal pada suhu 300–400°C, karena pada suhu lebih tinggi terjadi *cracking* sekunder yang

mengubah kondensat menjadi gas non-kondensabel (Ismi et al., 2024). Nilai tambah kedua produk tersebut bersifat ekonomis sekaligus ekologis, biochar berperan dalam sekuestrasi karbon jangka panjang (Ghosh et al., 2024; Li & Tasnady, 2023), sementara asap cair memiliki sifat antimikroba dan antioksidan (Dewi et al., 2023; Hernani et al., 2021; Surboyo et al., 2024).

Pirolisis lambat (*slow pyrolysis*) teridentifikasi sebagai metode paling efektif untuk memaksimalkan perolehan biochar dan asap cair secara simultan (Nachenius et al., 2013; Zhang et al., 2014). Laju pemanasan rendah ( $<10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ ) menjadi prasyarat utama untuk memfasilitasi reaksi pembentukan arang dan kondensasi asap cair (Zhang et al., 2014). Penggunaan bahan bakar gas LPG memberikan keunggulan kontrol suhu lebih presisi dan konsisten, menghasilkan profil pemanasan yang dapat direproduksi untuk pemodelan numerik (Menseidov et al., 2020).

Tantangan utama pengembangan teknologi pirolisis skala menengah di Indonesia adalah tingginya biaya eksperimental dan risiko kegagalan desain akibat metode *trial-and-error* (Aladin et al., 2017). Desain reaktor kontinu dengan sistem kontrol otomatis juga masih menjadi hambatan teknis (Menseidov et al., 2020). Secara ekonomi, profitabilitas bergantung pada kepastian pasar produk, terutama biochar yang pasarnya belum mapan di tingkat lokal (Roy & Dias, 2017). Kondisi ini menciptakan kebutuhan mendesak akan instrumen prediktif untuk mengurangi risiko desain sebelum fabrikasi.

Pemodelan kinetika pirolisis berbasis hukum Arrhenius orde satu mampu merepresentasikan degradasi termal biomassa lignoselulosa secara akurat (Torres-sciancalepore et al., 2022). Pada penelitian ini digunakan nilai  $E_a = 87,49 \text{ kJ/mol}$  dari Ko et al. (2025) karena diperoleh spesifik dari TKS menggunakan metode integral Coats-Redfern pada laju pemanasan  $5\text{--}20^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ , paling representatif untuk kondisi pirolisis lambat.

Selain pemodelan kinetika, *Response Surface Methodology* (RSM) terbukti efektif dalam optimasi parameter operasi pirolisis biomassa, termasuk pada TKS (Awad & Makkawi, 2024), dengan nilai  $R^2 > 0,9$  yang konsisten dilaporkan. Kombinasi pemodelan Arrhenius dengan optimasi RSM menawarkan pendekatan sinergis yang memberikan pemahaman fundamental tentang mekanisme degradasi termal sekaligus kerangka kerja efisien untuk menentukan kondisi operasi optimal.

Penelitian ini bertujuan membangun dan memvalidasi model simulasi numerik pirolisis lambat TKS berbahan bakar gas untuk memprediksi yield biochar dan asap cair pada suhu  $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ . Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data eksperimen dari Ko et al. (2025) serta data spesifik TKS Indonesia dari Setyawan et al. (2023) dan Nugroho

et al. (2025). Optimasi kondisi operasional dilakukan menggunakan RSM. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi instrumen prediktif akurat bagi desainer alat pirolisis untuk meminimalkan biaya R&D serta memberikan panduan operasional bagi industri pengolahan limbah sawit skala kecil-menengah di Indonesia.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental-numerik yang difokuskan pada pemodelan dan simulasi sistem pirolisis lambat tandan kosong sawit (TKS). Rancangan penelitian dibagi menjadi tiga tahapan: (1) pengembangan model matematis berbasis kinetika kimia dan fungsi yield produk, (2) simulasi numerik dengan kalibrasi parameter menggunakan Python 3.11, dan (3) validasi model terhadap data eksperimental multi-sumber. Seluruh komputasi dijalankan menggunakan library NumPy, SciPy (ODE solver LSODA), dan Matplotlib. Fokus utama simulasi adalah memprediksi distribusi yield biochar dan asap cair pada rentang suhu operasional 400–600°C.

### Spesifikasi Alat dan Bahan

Bahan utama yang dimodelkan adalah TKS dengan karakteristik kimia yang merujuk pada tiga sumber literatur utama dalam lima tahun terakhir (Tabel 1).

**Tabel 1. Karakteristik Proksimat dan Ultimat TKS/EFB dari Literatur 2023–2025**

| Parameter       | OPEFB<br>(Setyawan et al.,<br>2023) | EFB<br>(Ko et al.,<br>2025) | EFB Kal-Teng <sup>a</sup><br>(Nugroho et al.,<br>2025) | Satuan |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|--------|
| Selulosa        | 50,9                                | —                           | —                                                      | %      |
| Hemiselulosa    | 29,6                                | —                           | —                                                      | %      |
| Lignin          | 17,84                               | —                           | —                                                      | %      |
| Kadar abu       | 5,26                                | 1,65                        | —                                                      | %      |
| Fixed carbon    | 18,67                               | 26,45                       | —                                                      | %      |
| Volatile matter | 74,0                                | 71,91                       | —                                                      | %      |
| Karbon (C)      | 48,4                                | 46,58                       | —                                                      | %      |
| Hidrogen (H)    | 7,14                                | 5,94                        | —                                                      | %      |
| Oksigen (O)     | 43,74                               | 43,55                       | —                                                      | %      |
| Nilai kalor     | 17,86                               | —                           | —                                                      | MJ/kg  |

<sup>a</sup>Nugroho et al. (2025) hanya melaporkan data yield biochar (27% pada 500°C) tanpa analisis proksimat/ultimat, sehingga digunakan sebagai pembanding yield saja, bukan sebagai sumber parameter kinetika.

Pemilihan tiga dataset ini didasarkan pada keterwakilan geografis dan kelengkapan data kinetika: Ko et al. (2025) sebagai sumber Ea primer dengan karakterisasi kinetika komprehensif, Setyawan et al. (2023) mewakili OPEFB Jawa Timur, dan Nugroho et al. (2025)

mewakili EFB Kalimantan Tengah. Perbedaan volatile matter (71,91–74,0%) dan fixed carbon (18,67–26,45%) mencerminkan variabilitas alami TKS Indonesia yang perlu diakomodasi dalam validasi model (Rusdianasari et al., 2023).

Gambar 1 menunjukkan skema alat pirolisis lambat TKS berbahan bakar gas LPG yang terdiri dari (1) reaktor dengan media pasir silika sebagai penyimpan dan pendistribusi panas; (2) sistem kondensasi pipa spiral berpendingin air; dan (3) dinding isolasi semen berlapis lempung. Karena alat masih dalam tahap desain konseptual, dimensi fisik spesifik belum ditetapkan. Simulasi ini dikembangkan berbasis prinsip operasi sistem, bukan dimensi geometri tertentu, sehingga hasilnya bersifat generalisabel untuk reaktor dengan prinsip serupa.



**Gambar 1. Skema alat pirolisis lambat TKS berbahan bakar gas LPG**

### Model Kinetika Pirolisis

Komponen inti analisis numerik adalah pemodelan kinetika degradasi biomassa mengikuti hukum Arrhenius orde satu:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot (1 - \alpha)^n$$

Model orde satu dipilih karena terbukti secara empiris mampu merepresentasikan degradasi termal biomassa lignoselulosa pada rentang konversi menengah (0,04–0,67) yang relevan dengan pirolisis lambat 400–600°C (Torres-sciancalepore et al., 2022). Nilai energi aktivasi semu  $E_a = 87,49$  kJ/mol diperoleh dari Ko et al. (2025) menggunakan metode integral *Coats-*

*Redfern* pada laju 10°C/menit. Metode integral dipilih karena menghasilkan nilai  $E_a$  paling konsisten dan tidak sensitif terhadap data TGA (Xu et al., 2017).

### Model Yield Biochar

Prediksi produk padat menggunakan model yield biochar berbasis fungsi eksponensial yang dikalibrasi terhadap data Ko et al. (2025) subset 10°C/menit (5 titik, 400–600°C):

$$Y_{\text{biochar}} = a \cdot \exp(-b \cdot (T - c)) + d$$

Parameter kalibrasi:  $a = 11,1654$ ;  $b = 0,003052$ ;  $c = 363,26$ ;  $d = 22,1539$ . Bentuk eksponensial penurunan dipilih karena merepresentasikan mekanisme dekomposisi lignoselulosa dengan penurunan yield bersifat asimtotik, mencerminkan residu karbon dari lignin yang tidak terdekomposisi lebih lanjut (Dhar et al., 2022; Tomczyk et al., 2020). Parameter  $d$  ( $\approx 22,15\%$ ) konsisten dengan nilai fixed carbon TKS (18–26,45%), memberikan validasi fisik terhadap model. Estimasi yield asap cair menggunakan korelasi empiris dari Ko et al. (2025) yang menunjukkan pola nonlinear dengan maksimum pada 450–500°C akibat keseimbangan antara pembentukan kondensat dan reaksi cracking sekunder (Ismi et al., 2024).

### Data Validasi dari Literatur

Tiga sumber data eksperimen digunakan untuk validasi, seluruhnya diterbitkan dalam 5 tahun terakhir:

- Ko et al. (2025) sebagai dataset utama: Reaktor fixed-bed kuarsa ( $\varnothing 60$  mm), 15 g EFB, aliran  $N_2$  4 L/menit, penahanan 30 menit. Suhu: 400–600°C; laju: 5/10/20°C/menit (total 15 titik data). Dataset ini dipilih sebagai sumber  $E_a$  primer karena metodologi kinetika komprehensif dan kondisi eksperimen terkontrol dengan atmosfer inert  $N_2$ .
- Setyawan et al. (2023) sebagai pembanding Indonesia (Jawa Timur): OPEFB Jawa Timur, 500 g, pirolisis lambat 2 jam, 3 ulangan. Suhu: 400/500/600°C. Yield:  $\sim 45\%/\sim 32\%/\sim 30\%$ .
- Nugroho et al. (2025) sebagai pembanding Indonesia: EFB Kalimantan Tengah, 50 g, laju 3°C/menit, penahanan 1 jam. Suhu: 500/800/1000°C. Yield: 27/23/20%.

### Metrik Validasi

Keandalan model dievaluasi menggunakan tiga metrik komplementer: *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk deviasi absolut, *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) untuk deviasi relatif, dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) untuk proporsi varians data yang dijelaskan model (Awad & Makkawi, 2024; Urbina-salas et al., 2025). Model dinyatakan valid apabila  $MAPE < 15\%$  dan  $R^2 > 0,9$ .

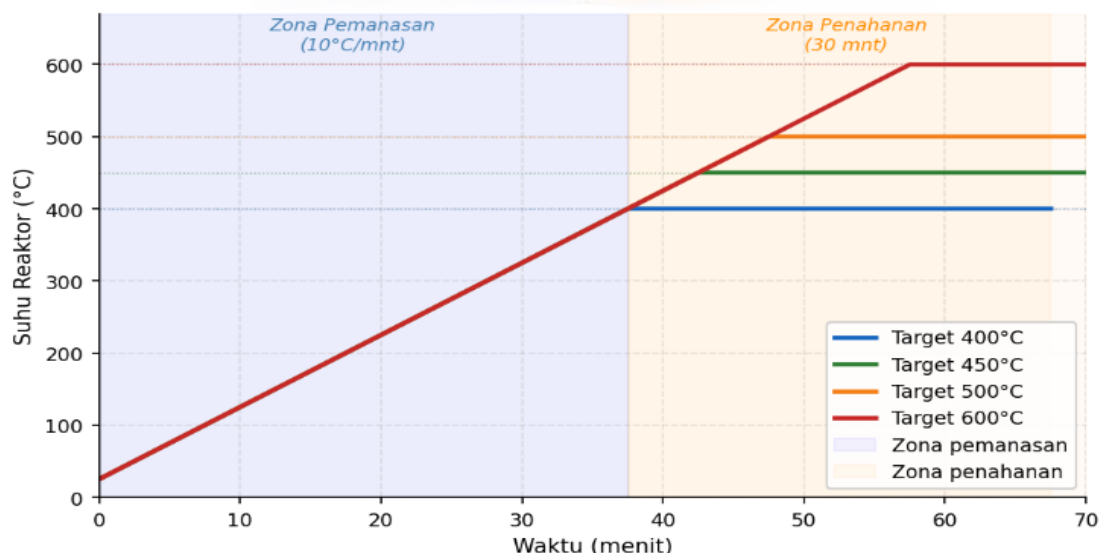


## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Profil Suhu Simulasi

Gambar 2 menunjukkan profil suhu simulasi reaktor untuk target 400–600°C pada laju pemanasan 10°C/menit, yang merupakan pemodelan yang divalidasi berdasarkan keunggulan sistem burner LPG dalam menghasilkan laju pemanasan terkontrol (Ko et al., 2025; Menseidov et al., 2020). Berdasarkan analisis TGA Ko et al. (2025), dekomposisi termal EFB dimulai pada ~210°C dan sebagian besar selesai pada 400°C. Pola ini konsisten dengan karakteristik dekomposisi lignoselulosa: hemiselulosa (220–315°C), selulosa (315–400°C), dan lignin (>400°C) (Kan et al., 2016; Yang, 2007). Implikasinya adalah pada rentang 400–600°C yang dikaji, proses dominan adalah dekomposisi lanjutan lignin dan stabilisasi struktur aromatik, sehingga penurunan yield biochar mengikuti pola asimtotik.

Ko et al. (2025) menganalisis kinetika menggunakan metode diferensial (*Friedman*) dan integral (*Coats-Redfern*). Metode integral menghasilkan  $E_a = 87,49$  kJ/mol yang konsisten untuk laju 5–20°C/menit pada konversi 0,04–0,67. Nilai ini berada dalam rentang tipikal biomassa lignoselulosa (60–300 kJ/mol) dan relatif rendah, mengindikasikan TKS mudah terdekomposisi, konsisten dengan kandungan volatile matter-nya yang tinggi (71,91–74,0%) (Tabel 1).

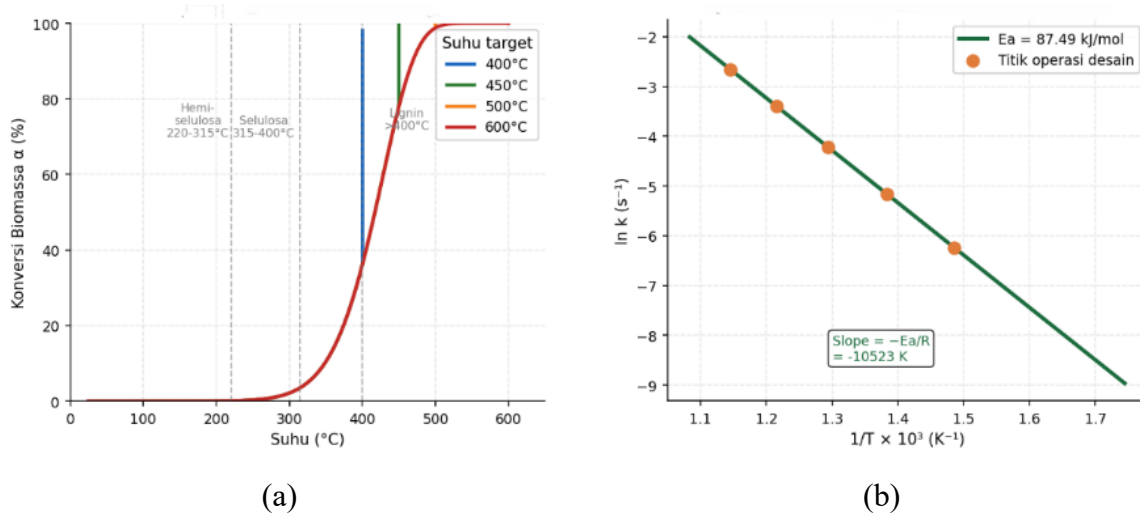


**Gambar 2. Profil Suhu Reaktor Pirolisis Lambat TKS (laju pemanasan 10°C/menit)**

### Kinetika Dekomposisi dan Parameter Arrhenius

Berdasarkan TGA Ko et al. (2025), dekomposisi EFB berlangsung dalam tiga tahap: (1) evaporasi air (25–150°C), (2) dekomposisi utama hemiselulosa-selulosa (150–400°C), dan (3) dekomposisi lambat lignin (>400°C). Fakta bahwa dekomposisi utama selesai pada 400°C

(Gambar 3a) menjelaskan mengapa penurunan yield biochar di atas 400°C bersifat lambat dan asimtotik, sesuai fungsi eksponensial model (Dhar et al., 2022; Tomczyk et al., 2020). Nilai  $E_a = 87,49$  kJ/mol yang stabil terhadap variasi laju pemanasan (metode integral) dipilih karena metode *Friedman* lebih sensitif terhadap data TGA (Xu et al., 2017). Arrhenius plot (Gambar 3b) menunjukkan linieritas baik, mengkonfirmasi validitas asumsi orde satu.



**Gambar 3. (a) Kurva Konversi Biomassa; (b) Arrhenius Plot [ $E_a = 87,49$  kJ/mol dari Ko et al. (2025)]**

Nilai  $E_a$  TKS lebih rendah dibanding jerami rapa (156–211 kJ/mol, Xu et al. (2017)) dan batang sawit (218–304 kJ/mol) (Shrivastava et al., 2025) namun sebanding dengan jerami gandum (45–119 kJ/mol) (Gesese et al., 2025). Hal ini konsisten dengan tingginya volatile matter TKS: senyawa mudah menguap memiliki ikatan lebih lemah dan energi aktivasi lebih rendah. Implikasi desain adalah berdasarkan persamaan Arrhenius, konstanta laju  $k$  meningkat ~2,95 kali dari 400°C ke 450°C. Sensitivitas tinggi ini menegaskan pentingnya kontrol suhu presisi (keunggulan burner LPG) dan menjelaskan mengapa suhu lebih dominan daripada waktu tinggal dalam analisis RSM.

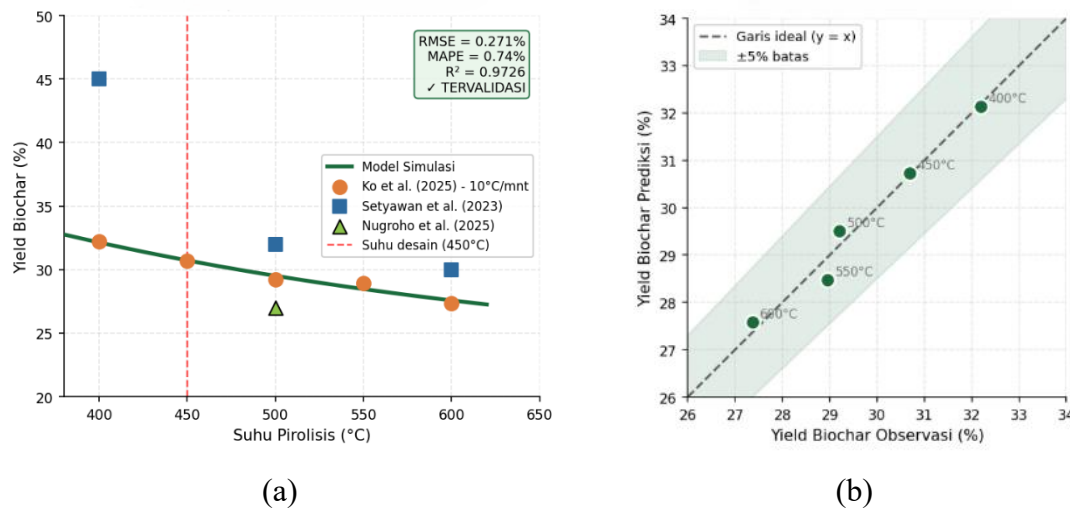
### Kesesuaian Model terhadap Data Kalibrasi Yield Biochar

Tabel 2 dan Gambar 4 menyajikan kesesuaian model terhadap data kalibrasi Ko et al. (2025) pada laju 10°C/menit. Model mencapai RMSE = 0,271%, MAPE = 0,74%, dan  $R^2 = 0,9726$ , jauh di bawah ambang MAPE < 15% dan sebanding dengan studi serupa (Awad & Makkawi, 2024; Urbina-salas et al., 2025).  $R^2 = 0,9726$  mengindikasikan model menjelaskan >97% variasi data.

Ko et al. (2025) melaporkan penurunan yield dari 32,19% (400°C) menjadi 27,37% (600°C), penurunan ~4,8 poin persentase akibat cracking senyawa tar pada suhu tinggi (Dhar



et al., 2022). Model mereplikasi tren ini dengan error absolut tertinggi hanya 0,48% (550°C). Pola error tidak sistematis (Gambar 8) dan parity plot (Gambar 4b) mengkonfirmasi tidak ada bias, sehingga model layak sebagai instrumen prediksi operasional.



**Gambar 4. (a) Validasi Model vs Data Eksperimen Literatur; (b) Parity Plot (Ko et al. (2025), 10°C/mnt)**

**Tabel 2. Kesesuaian Model terhadap Data Kalibrasi Yield Biochar (Ko et al., 2025)**

| No.         | Suhu (°C) | Yield Obs. (%)<br>(Ko et al., 2025) | Yield Model (%) | Error Abs. (%) | Error Rel. (%) |
|-------------|-----------|-------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1           | 400       | 32,19                               | 32,13           | 0,055          | 0,2            |
| 2           | 450       | 30,69                               | 30,72           | 0,032          | 0,1            |
| 3           | 500       | 29,21                               | 29,51           | 0,300          | 1,0            |
| 4           | 550       | 28,95                               | 28,47           | 0,481          | 1,7            |
| 5           | 600       | 27,37                               | 27,57           | 0,205          | 0,7            |
| RMSE=0,271% |           | MAPE=0,74%                          | R²=0,9726       | TERVALIDASI    | MAPE<15%       |

### Konsistensi dengan Data EFB Indonesia

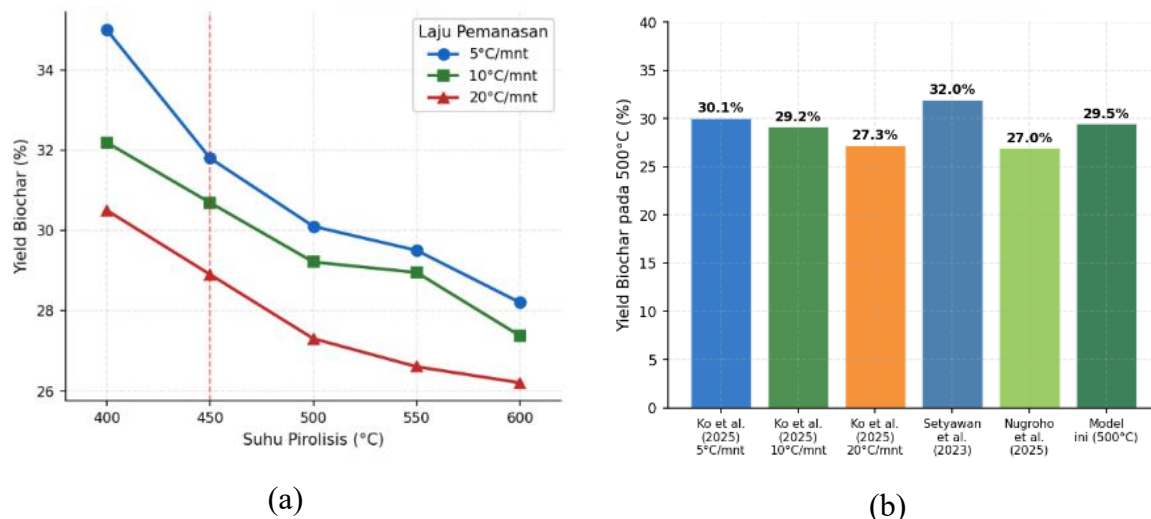
Tabel 3 membandingkan model dengan studi EFB Indonesia. Validasi data lokal penting untuk membuktikan relevansi model bagi industri kecil-menengah Indonesia. Setyawan et al. (2023) melaporkan yield lebih tinggi (~45% pada 400°C) dibanding prediksi model (32,1%), selisih ~12,9 poin persentase yang dapat dijelaskan oleh: (1) massa bahan lebih besar (500 g vs 15 g) menciptakan gradien suhu sehingga dekomposisi kurang sempurna; (2) tanpa gas inert, akumulasi uap mendorong reaksi kondensasi sekunder (Barr et al., 2020); (3) waktu penahanan lebih lama (2 jam) memungkinkan karbonisasi sekunder lebih lanjut (Babu et al., 2024).

Nugroho et al. (2025) melaporkan yield 27% pada 500°C (laju 3°C/menit). Model memprediksi 29,5%, selisih 2,5 poin yang dapat dijelaskan oleh efek laju pemanasan: laju lebih rendah seharusnya menghasilkan yield sedikit lebih tinggi (Ko et al., 2025). Deviasi model terhadap kedua dataset Indonesia (<3% pada 500–600°C) jauh di bawah MAPE 15%, sehingga model konsisten secara statistik.

**Tabel 3. Perbandingan Yield Biochar dari Literatur Terbaru (2023–2025)**

| Peneliti (Tahun)       | Suhu (°C) | Laju (°C/min) | Yield (%) | Keterangan                                                                            |
|------------------------|-----------|---------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Ko et al. (2025)       | 400–600   | 5/10/20       | 26,6–35,0 | Fixed bed quartz, 15 g EFB, N <sub>2</sub> 4 L/min. Dataset validasi utama studi ini. |
| Setyawan et al. (2023) | 400–600   | —             | 30–45     | OPEFB Jawa Timur, 500 g, 2 jam. Yield lebih tinggi karena waktu pirolisis lebih lama. |
| Nugroho et al. (2025)  | 500–1000  | 3             | 20–27     | EFB Kalimantan Tengah, 50 g, hold 1 jam. Yield 27% @500°C mendekati prediksi model.   |
| Model ini              | 400–600   | 10            | 27,6–32,1 | Simulasi numerik dikalibrasi vs Ko (2025). Ea = 87,49 kJ/mol.                         |

### Pengaruh Laju Pemanasan



**Gambar 5. Pengaruh Laju Pemanasan terhadap Yield Biochar dan Perbandingan Studi pada 500°C; (a) Pengaruh suhu dan laju pemanasan Ko et al. (2025) dan (b) Perbandingan Yield Biochar pada 500°C berbagai studi literatur.**

Gambar 5 menunjukkan pengaruh laju pemanasan berdasarkan data Ko et al. (2025). Perbedaan yield antar laju (5/10/20°C/menit) relatif kecil (<3 poin), namun pola konsisten dengan teori: laju lebih rendah menghasilkan yield biochar sedikit lebih tinggi. Penjelasan mekanistik: pada laju rendah, uap pirolisis memiliki waktu tinggal lebih lama di zona panas, sehingga reaksi char-forming sekunder berlangsung lebih sempurna (Nachenius et al., 2013; Zhang et al., 2014). Implikasi praktis berupa laju 10°C/menit merupakan kompromi baik antara yield biochar (~30–32%) dan produksi asap cair (~16–19%), sesuai tujuan produksi simultan.

### Prediksi Kondisi Operasi Alat Desain

Tabel 4 menyajikan prediksi model untuk alat pirolisis berbahan bakar gas LPG. Suhu 450°C dipilih sebagai titik operasi desain karena: (1) berada di atas ambang dekomposisi sempurna selulosa (400°C) sehingga konversi memadai; (2) masih cukup rendah mempertahankan yield biochar >30%; (3) menghindari cracking berlebihan yang menurunkan kualitas asap cair (Dhar et al., 2022; Ismi et al., 2024). Perlu dicatat bahwa prediksi yield asap cair pada Tabel 4 merupakan estimasi berdasarkan korelasi empiris Ko et al. (2025) dan belum didukung data eksperimen pembanding langsung; validasi eksperimental asap cair perlu dilakukan pada penelitian berikutnya.

Konstanta laju ( $k$ ) meningkat eksponensial dari  $1,95 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (400°C) menjadi  $7,00 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  (600°C) atau peningkatan ~36 kali, konsisten dengan persamaan Arrhenius. Estimasi yield asap cair maksimum pada 500°C (18,9%) dan lebih rendah pada 400°C (17,7%) dan 600°C (17,7%) konsisten dengan temuan Ismi et al. (2024) dan Guo et al. (2022) tentang dominasi cracking sekunder pada suhu tinggi.

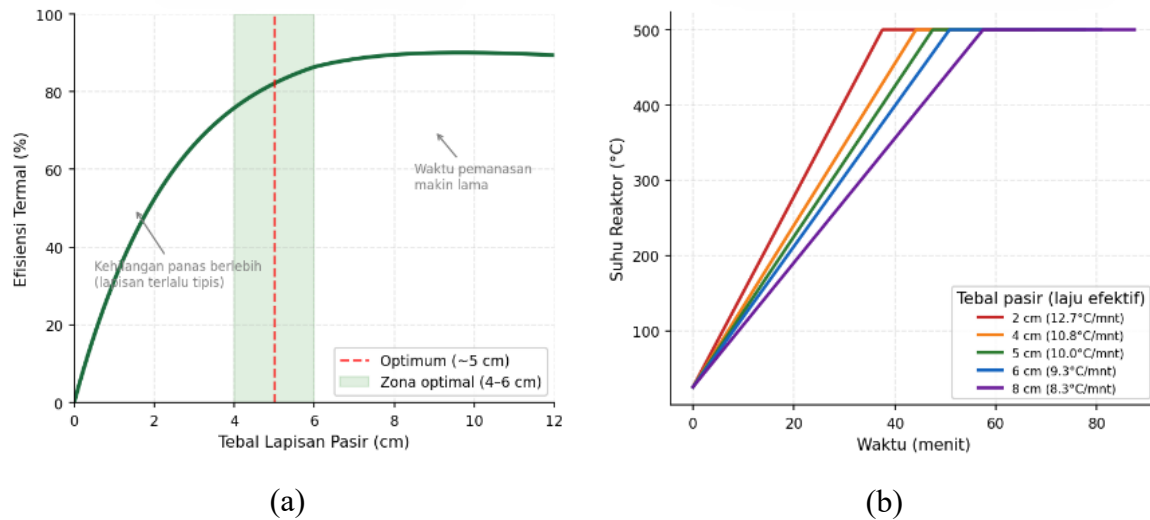
**Tabel 4. Prediksi Model untuk Kondisi Operasi Alat Pirolisis Berbahan Bakar Gas**

| Suhu (°C) | Yield Biochar Model (%) | Yield Asap Cair Est. (%) | Konstanta Laju $k \text{ (s}^{-1}\text{)}$ | Keterangan     |
|-----------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|----------------|
| 400       | 32,1                    | 17,7                     | $1,95 \times 10^{-3}$                      | ← Suhu operasi |
| 450       | 30,7                    | 18,6                     | $5,75 \times 10^{-3}$                      |                |
| 500       | 29,5                    | 18,9                     | $1,47 \times 10^{-2}$                      |                |
| 550       | 28,5                    | 18,6                     | $3,37 \times 10^{-2}$                      |                |
| 600       | 27,6                    | 17,7                     | $7,00 \times 10^{-2}$                      |                |

### Analisis Sensitivitas dan Optimasi RSM

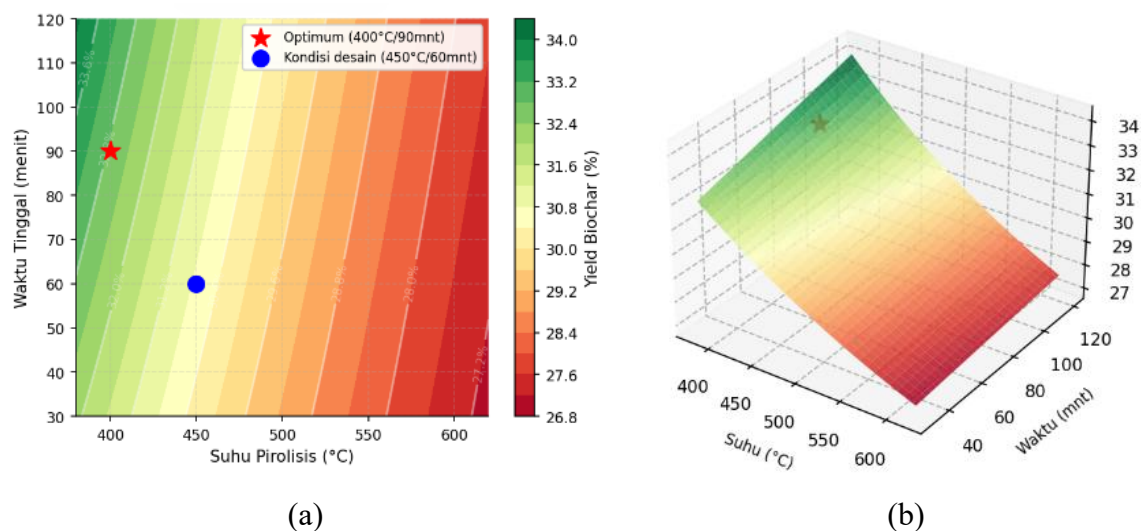
Gambar 6 menunjukkan analisis sensitivitas tebal lapisan pasir sebagai media penyimpanan panas. Tebal 5 cm memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi termal dan waktu pemanasan. Lapisan <3 cm menyebabkan kehilangan panas berlebih; >8 cm memperpanjang waktu pemanasan dan meningkatkan inersia termal (Nachenius et al., 2013). Pasir silika dipilih

karena kapasitas kalor spesifik tinggi ( $\sim 835 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) dan distribusi panas merata menjadi prasyarat laju pemanasan konstan (Kan et al., 2016).



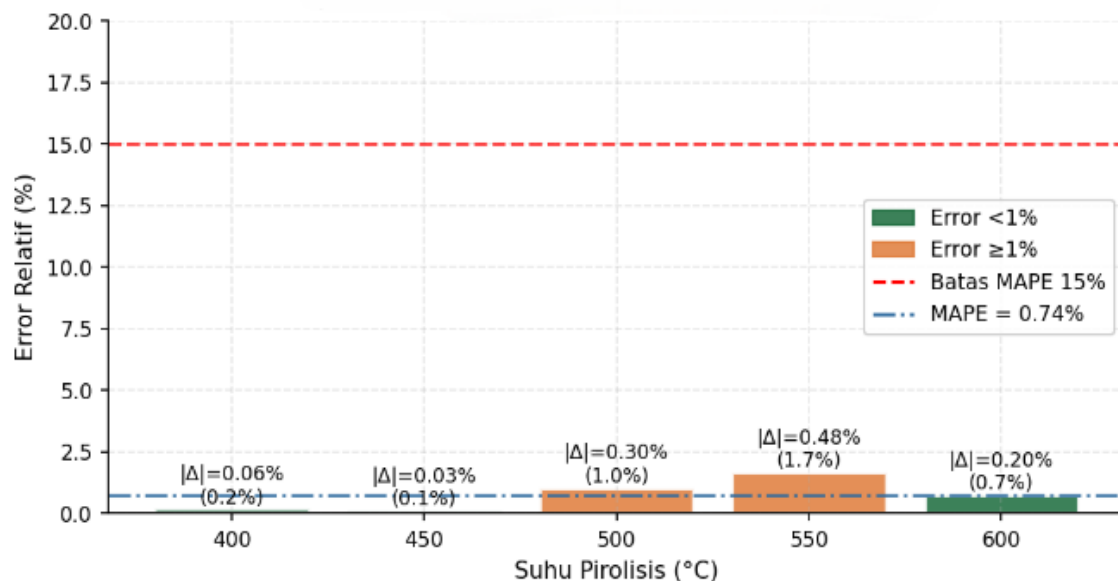
**Gambar 6. Analisis Sensitivitas Pengaruh Tebal Lapisan Pasir terhadap Efisiensi Termal; (a) Efisiensi vs tebal lapisan pasir dan (b) Profil suhu vs tebal lapisan pasir**

Analisis RSM (Gambar 7) mengidentifikasi kondisi optimum pada  $400^\circ\text{C}$  dan 90 menit untuk memaksimalkan yield biochar ( $\sim 34\%$ ). Pada kondisi desain  $450^\circ\text{C}/60$  menit, yield diestimasi  $\sim 31\%$ . Dominannya pengaruh suhu dibanding waktu tinggal konsisten dengan Lee et al. (2017) dan (Setyawan et al., 2023), serta dapat dijelaskan secara teoritis: karena  $E_a$  relatif tinggi ( $87,49 \text{ kJ/mol}$ ), reaksi sangat sensitif terhadap suhu (eksponensial) dibanding variasi waktu dalam rentang 60–120 menit.



**Gambar 7. Response Surface Methodology: Optimasi Suhu dan Waktu Pirolisis; (a) Contour Plot RSM) dan (b) Response Surface 3D**

Pola error pada Gambar 8 tidak menunjukkan tren monoton terhadap suhu, error tidak membesar/mengecil seiring kenaikan suhu, mengindikasikan tidak ada bias sistematis, deviasi bersifat acak dan dalam batas toleransi pemodelan termokimia biomassa (Awad & Makkawi, 2024).



**Gambar 8. Error Prediksi per Suhu (Ko et al. (2025), 10°C/mnt)**

Biochar pada 400–450°C diprediksi memiliki kapasitas tukar kation dan retensi air baik untuk pembenahan tanah tropis (Bo et al., 2023; Khan et al., 2024). Pada rentang ini, gugus fungsional mengandung oksigen masih terjaga, sehingga retensi hara lebih tinggi dibanding biochar suhu >500°C (Dhar et al., 2022). Asap cair sebagai ko-produk pada 450°C (18,6%) mengandung senyawa fenolik dan asam organik yang memberikan aktivitas antimikroba (Guo et al., 2022; Surboyono et al., 2024) potensial sebagai biopestisida organik. Secara keseluruhan, kombinasi kedua produk pada operasi 450°C berpotensi menjadi pilihan operasional yang menguntungkan. Sebagai verifikasi lintas-cek terhadap keseluruhan performa model, seluruh deviasi prediksi pada lima titik suhu validasi (400–600°C) berada jauh di bawah ambang MAPE 15%, dengan error tertinggi hanya 1,7% pada 550°C dan error terendah 0,1% pada 450°C. Nilai RMSE = 0,271%, MAPE = 0,74%, dan  $R^2 = 0,9726$  mengkonfirmasi bahwa distribusi error bersifat acak tanpa bias sistematis, sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 8, sehingga model dinyatakan valid dan layak sebagai instrumen prediksi operasional alat pirolisis desain.

### **Keterbatasan Penelitian**

Model yang dikembangkan memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, validasi dilakukan pada skala laboratorium (15–500 g) sehingga kesimpulan berlaku untuk reaktor skala kecil-menengah, bukan skala industri penuh. Kedua, prediksi yield asap cair bersifat estimasi berbasis korelasi empiris Ko et al. (2025) dan belum divalidasi secara eksperimental; validasi langsung diperlukan pada penelitian lanjutan. Ketiga, kondisi atmosfer N<sub>2</sub> terkontrol pada Ko et al. (2025) berbeda dengan desain alat berbahan bakar LPG terbuka, sehingga penerapan model perlu mempertimbangkan perbedaan kondisi atmosfer ini

### **KESIMPULAN**

Penelitian ini berhasil membangun dan memvalidasi model simulasi numerik pirolisis lambat TKS berbahan bakar gas LPG untuk memprediksi yield biochar dan asap cair pada suhu 400–600°C. Model kinetika Arrhenius orde satu dengan  $E_a = 87,49$  kJ/mol mencapai akurasi sangat tinggi (RMSE = 0,271%, MAPE = 0,74%,  $R^2 = 0,9726$ ) terhadap data Ko et al. (2025). Distribusi error per suhu tidak menunjukkan bias sistematis dan seluruh deviasi lebih kecil dari ambang MAPE 15%, mengkonfirmasi validitas saintifik model sebagai instrumen prediksi. Validasi terhadap data TKS Indonesia (Nugroho et al., 2025; Setyawan et al., 2023) menunjukkan konsistensi dengan deviasi <3% pada suhu 500–600°C. Perbedaan yield pada 400°C dijelaskan oleh perbedaan kondisi operasi (massa bahan, waktu penahanan, gas inert), menekankan pentingnya keseragaman protokol eksperimen. Pada suhu operasi alat desain 450°C, model memprediksi yield biochar 30,7% dan asap cair 18,6%. Biochar pada 400–450°C diprediksi mempertahankan gugus fungsional oksigen tinggi, menguntungkan untuk pembenahan tanah tropis, sementara asap cair mengandung senyawa fenolik potensial sebagai biopestisida organik. Analisis RSM mengidentifikasi kondisi optimum pada 400°C/90 menit untuk yield biochar maksimal (~34%), dengan suhu jauh lebih dominan dari waktu tinggal, implikasi langsung dari eksponensialitas hukum Arrhenius yang bernilai praktis bagi operator. Kombinasi model kinetika Arrhenius dan optimasi RSM terbukti efektif untuk memprediksi dan mengoptimalkan operasi pirolisis lambat TKS sebelum fabrikasi, berpotensi mereduksi biaya dan risiko trial-and-error eksperimental secara signifikan.



## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknologi Pertanian, Universitas Bengkulu atas dukungan dana melalui Skema Penelitian Dana RBA 2025 dengan nomor kontrak 4477/UN30.11/PT/2025.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aladin, A., Alwi, R. S., & Syarif, T. (2017). Design of pyrolysis reactor for production of bio-oil and bio-char simultaneously. In W. null, T. F., & N. S. (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1840). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.4982340>
- Awad, M. I., & Makkawi, Y. (2024). Yield and energy modeling for biochar and bio-oil using pyrolysis temperature and biomass constituents. *ACS Omega*, 9(16), 18654–18667. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01646>
- Babu, S., Rambhatla, N., & Kumar, R. (2024). 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, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2024.01.002>
- Barr, M. R., Volpe, M., Messineo, A., & Volpe, R. (2020). On the suitability of thermogravimetric balances for the study of biomass pyrolysis. *Fuel*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118069>
- Bo, X., Zhang, Z., Wang, J., Guo, S., Li, Z., Lin, H., & Lam, S. S. (2023). Benefits and limitations of biochar for climate-smart agriculture: A review and case study from China. *Biochar*, 5, 77. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00241-x>
- Dewi, F. C., Tuhuteru, S., Aladin, A., & Yani, S. (2023). Potential utilization of liquid smoke *Pandanus conoideus* as a natural preservative of fish during storage. *AIP Conference Proceedings* 2596, February. <https://doi.org/10.1063/5.0120215>
- Dhar, S. A., Sakib, T. U., & Hilary, L. N. (2022). Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(7), 2631–2647. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01116-y>
- Gesese, T. N., Getahun, E., & Getahun, A. A. (2025). Pyrolysis kinetics, thermodynamics, and reaction performance of wheat straw and water hyacinth using TGA-DTG analysis: Bioenergy potential in Ethiopia. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 19(3), 705–729. <https://doi.org/10.1002/bbb.2730>
- Ghosh, D., Maiti, S. K., Ali, S. A., Bhattacharya, S., Nandipamu, T. M. K., Pramanick, B., & Preet, M. S. (2024). Biochar as climate-smart strategy to address climate change mitigation and adoption in 21st century. In *Biochar Production for Green Economy: Agricultural and Environmental Perspectives* (pp. 413–431). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15506-2.00009-2>
- Guo, G., Huang, Q., Jin, F., Lin, L., Wang, Q., Fu, Q., Liu, Y., Sajjad, M., Wang, J., Liao, Z., & Cai, M. (2022). Exploration of the Interrelationship within Biomass Pyrolysis Liquid Composition Based on Multivariate Analysis. *Molecules*, 27, 1–15.



- <https://doi.org/10.3390/molecules27175656>
- Hardianto, T., Wenas, A. A., & Juangsa, F. B. (2023). Upgrading process of palm empty fruit bunches as alternative solid fuel: A review. *Clean Energy*, 7, 1173–1188. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad058>
- Hernani, Yuliani, S., & Rahmini. (2021). Natural biopesticide from liquid rice hull smoke to control brown planthopper. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 733(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012067>
- Ismi, N., Mahdianti, S., Andriansyah, Wardana, F., Azhar, A., Nugraheni, I. F., & Wahyuni, S. (2024). Production of liquid smoke using auto thermal slow pyrolysis method and its application for plant pesticide. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1414(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1414/1/012041>
- Janta-In, C., Wiriylapsakul, K., & Srinophakun, T. R. (2022). Environmental and economic analysis of a biodiesel power plant derived from the fast pyrolysis of empty fruit bunches. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 27(2).
- Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
- Khan, T. A., Saud, A. S., Jamari, S. S., Ab Rahim, M. H., Park, J. W., & Kim, H. J. (2024). Biochar for soil amendment: Applications, benefits, and environmental impacts. *Plants*, 13(2), 166. <https://doi.org/10.3390/plants13020166>
- Ko, H., Lee, M., Sen, R., Choi, J., & Oh, S. (2025). Pyrolysis Characteristics of Empty Fruit Bunches at Different Temperatures and Heating Rates. *Energies*, 18(6), 1404. <https://doi.org/10.3390/en18061404>
- Lee, X. J., Lee, L. Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., & Ng, H. K. (2017). Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: Thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies. *Bioresource Technology*, 236, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.033>
- Li, S., & Tasnady, D. (2023). Biochar for Soil Carbon Sequestration: Current Knowledge, Mechanisms, and Future Perspectives. *C-Journal of Carbon Research*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/c9030067>
- Marhani, Sahur, A., Laban, S., & Musa, Y. (2022). Characterization of Biochar Empty Fruit Bunches OPEFB at Various Temperatures and Burning Time. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 10(3), 599–606. [https://doi.org/10.18006/2022.10\(3\).599.606](https://doi.org/10.18006/2022.10(3).599.606)
- Menseidov, D., Zheleva, I., & Filipova, M. (2020). Test and training model of a pyrolysis unit with three vertical tigels. In T. M.D. & T. M.D. (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2302). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0034771>
- Nachenius, R. W., Ronsse, F., Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2013). Biomass Pyrolysis. In *Advances in Chemical Engineering* (Vol. 42, pp. 75–139). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386505-2.00002-X>
- Nugroho, F. G., Ansari, A. S., Rochman, N. T., Khadtare, S. S., Sree, V. G., Shrestha, N. K., Hafiyyan, A. F., Im, H., & Ahmed, A. T. A. (2025). Utilizing Indonesian Empty Palm Fruit Bunches: Biochar Synthesis via Temperatures Dependent Pyrolysis.

- Nanomaterials*, 15(1), 50. <https://doi.org/10.3390/nano15010050>
- Roy, P., & Dias, G. (2017). Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.136>
- Rusdianasari, R., Arisetyadhi, I., Kalsum, L., Bow, Y., Syarif, A., & Arifin, F. (2023). Characterization of Empty Fruit Bunch of Palm Oil as Co-firing Biomass Feedstock. *Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment*, 7, 74–78.
- Setyawan, H. Y., Safira, L., Mulyarto, A. R., Wijana, S., & Pranowo, D. (2023). The effect of pyrolysis temperature and ball-milling duration on characteristics of micro bio-char derived from oil palm empty fruit bunches. *Sustainable Environment*, 9(1), 2173041. <https://doi.org/10.1080/27658511.2023.2173041>
- Shrivastava, P., Palamanit, A., & Kumar, A. (2025). Isoconversional thermal decomposition reaction kinetics of oil palm trunk and rubberwood sawdust for thermochemical conversion processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(32), 19015–19025. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28998-5>
- Surboyo, M. D. C., Baroutian, S., Puspitasari, W., Zubaidah, U., Handy, P., Cecilia, Mansur, D., Iskandar, B., Ayuningtyas, N. F., Mahdani, F. Y., & Ernawati, D. S. (2024). Health benefits of liquid smoke from various biomass sources: a systematic review. *BIO Integration*, 5(1), 1–19. <https://doi.org/10.15212/bioi-2024-0083>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191–215.
- Torres-sciancalepore, R., Asensio, D., Nassini, D., Fernandez, A., Rodriguez, R., Fouga, G., & Mazza, G. (2022). Assessment of the behavior of Rosa rubiginosa seed waste during slow pyrolysis process towards complete recovery: Kinetic modeling and product analysis. *Energy Conversion and Management*, 272(October), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116340>
- Urbina-salas, I., Granados-lieberman, D., Amezcuita-sanchez, J. P., Valtierra-rodriguez, M., & Rodriguez-alejandro, D. A. (2025). *Hardware – Software System for Biomass Slow Pyrolysis : Characterization of Solid Yield via Optimization Algorithms*. 1–32.
- Wulandari, A., Hartono, D. M., & Dahlan, A. V. (2023). Life cycle assessment analysis of empty oil palm fruit bunches waste from palm oil mill activities. In S. O. (Ed.), *E3S Web of Conferences* (Vol. 422). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342201001>
- Wulandari, A., Hartono, D. M., & Dahlan, A. V. (2024). Life cycle assessment analysis of empty fruit bunches utilization: A case study in Riau province. In T. S. & I. M.A. (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3215, Issue 1). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/5.0235580>
- Xu, L., Jiang, Y., & Wang, L. (2017). Thermal decomposition of rape straw: Pyrolysis modeling and kinetic study via particle swarm optimization. *Energy Conversion and Management*, 146, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.020>
- Yang, H. (2007). *Characteristics of hemicellulose , cellulose and lignin pyrolysis*. 86, 1781–



1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

Yusuf, F. R., Suprihatin, S., & Indrasti, N. S. (2025). Improving the environmental performance of palm oil industry through the utilization of empty oil palm bunches as organic fertilizer and biochar for soil amendment. *Environmental Challenges*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101185>

Zhang, Z. X., Wu, J., & Chen, W. F. (2014). Review on preparation and application of biochar. *Advanced Materials Research*, 898, 456–460. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.898.456>