
**OPTIMALISASI SUHU DAN WAKTU TINGGAL PADA PROSES TOREFAKSI DAUN
KESAMBI (*Schleichera oleosa*)**

**Jemmy J. S. Dethan¹⁾, Fredrik J. Haba Bunga¹⁾, Marthen Makaborang¹⁾, Marten L. Lano¹⁾,
Jemseng Ch. Abineno²⁾**

¹⁾Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Kristen Artha Wacana Kupang Indonesia;

²⁾Jurusan Manajemen Lahan Kering, Politani Negeri, Kupang, Indonesia;

Email address: jemmydethan19@gmail.com

ABSTRAK

Torefaksi pada daun kesambi dilakukan untuk meningkatkan kualitas biomassa, khususnya dalam konteks pemanfaatan energi. Torefaksi adalah proses termal yang meningkatkan nilai kalor dan kepadatan energi biomassa, dapat mengurangi kadar air dalam biomassa, mengurangi kandungan bahan mudah menguap dalam biomassa, meningkatkan kandungan karbon tetap, mempermudah proses penggilingan dan penanganan, membakar lebih efisien dengan emisi yang lebih rendah, menciptakan alternatif ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan mendukung keberlanjutan lingkungan. Suhu dan waktu tinggal merupakan variable penting dalam proses torefaksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu dan lama tinggal terhadap kadar air, abu, bahan volatil, dan karbon tetap. Penelitian dilakukan menggunakan reaktor vertikal berdiameter 400 mm dan panjang 600 mm, keranjang besi setinggi 500 mm ditempatkan 100 mm di dasar reaktor. Kontrol suhu menggunakan termokopel tipe K. Penelitian dilakukan menggunakan Response Surface Methodology (RSM) dengan Central Composite Design (CCD) untuk pemodelan respon. Suhu torefaksi (200-300 °C) dan durasi tinggal (10-20 menit) diperiksa. Peningkatan suhu torefaksi dan waktu tinggal yang optimal berpengaruh terhadap kadar air, abu, bahan volatil, dan karbon tetap. Kondisi optimal adalah suhu 300 °C dan waktu tinggal 20 menit, menghasilkan kadar air 3,76%, abu 4,02%, bahan volatil 25,08%, dan kandungan karbon tetap 66,67%.

Kata kunci : Daun Kesambi, Suhu, Torefaksi, Waktu Tinggal

PENDAHULUAN

Energi yang dihasilkan dari daun kesambi masih berpotensi untuk ditingkatkan melalui proses torefaksi. Torefaksi memanaskan biomassa pada suhu 200 °C-300 °C tanpa oksigen, menghasilkan produk yang lebih padat, seragam, kadar air rendah, energi tinggi, yang melibatkan devolatilisasi, dan karbonisasi (Tumuluru et al., 2021). Suhu dan lama tinggal yang ideal untuk torefaksi biomassa adalah sekitar 275 °C dan 30 menit (Martín-Pascual et al., 2020). Biomassa dapat terbakar atau hangus jika terkena panas berlebih, sehingga menghasilkan tingkat gas yang sangat rendah (Tang et al., 2022). Penggunaan suhu torefaksi dan lama waktu tinggal dalam proses torefaksi cukup untuk meningkatkan kinerja dan ruang lingkup proses (Ajikashile et al., 2023). Efisiensi karbonisasi hasil torefaksi adalah 40% dari biomassa awal dengan daya 80% atau 70% dari material aslinya (Malak et al., (2016). Karboksimetilselulosa 10% memiliki nilai kalor lebih tinggi dibandingkan pati 10% (Idris et al., 2021). Produk torefaksi memiliki nilai kalor lebih besar, kandungan karbon lebih banyak, dan kepadatan lebih baik dibandingkan bahan bakunya (Rasid et al., 2019).

Optimalisasi suhu dan waktu tinggal pada proses torefaksi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi serbuk gergaji pohon pinus, ampas tebu dan tongkol jagung (Ozonoh et al., 2020), cangkang kelapa sawit (Dirgantara et al., 2020), batang pohon *Acacia nelotica* (Singh et al., 2019),

batang pohon khat (Jifara Daba & Mekuria Hailegiorgis, 2023). Dengan menentukan parameter-parameter ini secara cermat, penelitian torefaksi daun kesambi dapat mencari kondisi yang paling efektif dalam meningkatkan kualitas biomassa daun kesambi sebagai bahan bakar.

Torefaksi pada daun kesambi dilakukan untuk meningkatkan kualitas biomassa, khususnya dalam konteks pemanfaatan energi. Torefaksi adalah proses termal yang meningkatkan nilai kalor dan kepadatan energi biomassa (Li & You, 2022), dapat mengurangi kadar air dalam biomassa, mengurangi kandungan bahan mudah menguap dalam biomassa, meningkatkan kandungan karbon tetap (Limousy et al., 2017); (Tumuluru et al., 2021).

Torefaksi juga mempermudah proses penggilingan dan penanganan biomassa (Haseli, 2019); (Wang et al., 2020), membakar lebih efisien dengan emisi yang lebih rendah, menciptakan alternatif ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Chen et al., 2021); (Kota et al., 2022) dan mendukung keberlanjutan lingkungan (Nunes & Matias, 2020; Ribeiro et al., 2018; Thrän, 2016). Suhu dan waktu tinggal merupakan variabel penting dalam proses torefaksi.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini telah dilakukan pada bulan Maret 2023, di Laboratorium Eksakta Universitas Kristen Artha Wacana di Kupang. Daun kesambi digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari kecamatan Alak Kota Kupang. Daun kesambi selanjutnya kemudian diayak menggunakan ayakan Tyler 60 mesh setelah digiling halus menggunakan *Disc Mill* 0,3 mm. Selama tahap pengujian, suhu dipantau dan dijaga menggunakan termokopel tipe K.

Reaktor

Pengujian torefaksi daun kesambi menggunakan reaktor vertikal. Ukuran reaktor panjang 600 mm dan diameter 400 mm. Alat ini mampu menahan panas hingga 600 °C di dalam reaktor. Daun kesambi ditempatkan dalam kotak aluminium di dalam keranjang besi yang berada 100 mm di atas dasar reaktor. Suhu reaktor dijaga dengan menggunakan sensor termokopel tipe K. Pemanas berada di dasar reaktor yang dilapisi bahan seng untuk menghantarkan panas.

Desain Percobaan

Desain percobaan menggunakan aplikasi *Design Expert 13* (DX 13) dengan metode *RSM* dan *CCD* untuk pengujian torefaksi daun kesambi. *RSM* memungkinkan penghitungan respons di setiap tempat di permukaan, tidak hanya pada titik-titik yang dipelajari secara empiris (Medic, 2012).

Suhu torefaksi dimodelkan sebagai variabel x1 dan waktu tinggal dimodelkan sebagai variabel x2. Torefaksi berlangsung antara 10 dan 20 menit pada suhu antara 200 dan 300 °C.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dimulai dengan pengeringan awal di bawah sinar matahari selama 1 minggu. Kemudian kesambi yang telah dicacah sebanyak 100 gram dimasukkan ke dalam reaktor torefaksi sesuai urutan percobaan, kemudian dipanaskan hingga suhu dan waktu torefaksi yang diperlukan. Setelah itu produk didinginkan dan dianalisis dan dilakukan verifikasi dan validasi model.

Parameter Penelitian

Pengujian kadar air menggunakan metode D3173, D1102-84 untuk kadar abu, D 3175 untuk mudah menguap dan karbon tetap menggunakan ASTM D3172.

Analisis Data

Data yang diperoleh kemudian dianalisis dengan DX 13 dan *RSM CCD*. Validasi model dilakukan setelah pemrosesan data untuk konstruksi model. Keefektifan model dinilai dengan menggunakan uji *Lack of Fit*, koefisien determinasi, dan uji asumsi *residual*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Suhu Torefaksi dan Waktu Tinggal Terhadap Respon: Analisis Hubungan Model

Model dikembangkan mempertimbangkan suhu torefaksi dan waktu tinggal yang ideal untuk menghasilkan produk torefaksi dengan kadar air, abu, bahan mudah menguap, dan karbon tetap yang diperlukan. Respon permukaan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Respon Suhu Dan Waktu Tinggal

<i>Std</i>	<i>Run</i>	A: Suhu (°C)	B: Waktu tinggal (menit)	Kadar air (%)	Abu (%)	Bahan mudah menguap (%)	Karbon tetap (%)
2	1	300	10	6,46	4,87	39,14	49,52
7	2	250	8	8,07	5,48	50,77	35,68
13	3	250	15	5,34	4,16	39,58	50,93
9	4	250	15	5,49	4,56	33,91	56,03
8	5	250	22	3,65	4,31	29,56	62,48
4	6	300	20	3,63	3,75	27,90	64,72
5	7	180	15	6,67	5,02	42,85	45,46
1	8	200	10	7,64	5,28	50,47	36,62
3	9	200	20	4,14	4,54	35,51	55,81
12	10	250	15	5,43	4,14	33,16	57,27
6	11	320	15	4,01	3,65	25,52	66,83
11	12	250	15	5,39	4,84	31,13	58,64
10	13	250	15	4,01	4,12	31,49	60,38

Hasil *RSM* menunjukkan model linier kadar air, model linier kadar abu, model kuadrat bahan mudah menguap, dan model kuadrat karbon tetap, disajikan pada Tabel 2. Model tersebut tidak signifikan dan cocok untuk memprediksi suhu torefaksi dan waktu tinggal masing-masing untuk kadar air, abu, bahan mudah menguap, dan karbon tetap.

Tabel 2. Respon Model Matematika Terhadap Kadar Air, Kadar Abu, Bahan Volatil, Dan Karbon Tetap

<i>Source</i>	Kadar Air (%)	Abu (%)	Bahan Volatil (%)	Karbon Tetap (%)
---------------	---------------	---------	-------------------	------------------

Model	Linier	Linier	Kuadrat	Kuadrat
<i>F-value</i>	38.66	13.40	5.26	6.20
<i>P-Value</i>	< 0,0001	0,002	0,04	0,03
<i>Lack of Fit</i>	0,61	0,99	0,23	0,32
<i>R²</i>	0,89	0,73	0,93	0,95
<i>Adjusted R²</i>	0,86	0,67	0,88	0,91
<i>Predicted R²</i>	0,82	0,545	0,83	0,86
<i>Adeq Precision</i>	170.22	107.58	131.69	151,87

Koefisien determinasi R^2 untuk kadar air, abu, bahan volatil, dan kandungan karbon tetap, menunjukkan bahwa data tersebut memadai untuk model respons dan dapat mewakili model secara akurat, mendekati 1.

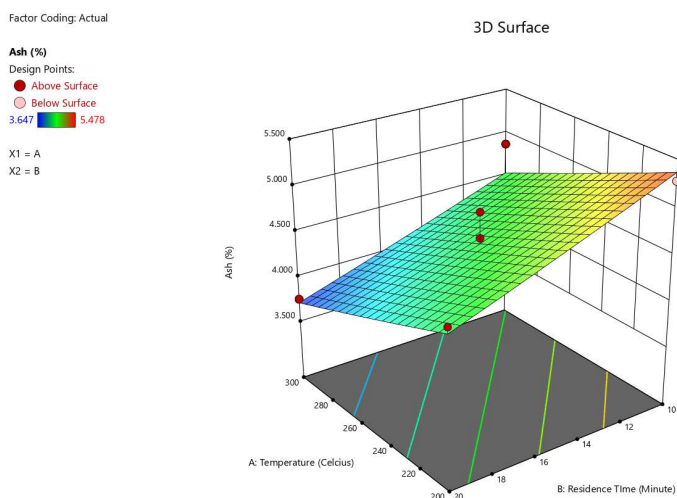
Untuk kadar air, abu, bahan mudah menguap, dan kandungan karbon tetap, perbedaan antara R^2 yang disesuaikan dan R^2 yang diprediksi kurang dari 0,2, yang menunjukkan kesesuaian yang memuaskan dengan model dan memenuhi kriteria. Nilai Adeq Precision setiap parameter melebihi 4, yang menunjukkan bahwa model dapat menyesuaikan ruang dengan akurasi yang cukup.

Respon Kadar Air

Persamaan 1 menyajikan model *RSM* untuk memaksimalkan suhu dan durasi tinggal terhadap respon kadar air.

$$\text{Kadar air} = 5,38 - 0,6821 x_1 - 1,57x_2 \quad 1)$$

Gambar 1 menampilkan plot permukaan respon kadar air. Pada suhu 300 °C dan waktu tinggal 20 menit, respon kadar air berada pada titik terendah. Temperatur torefaksi yang lebih tinggi dan waktu torefaksi yang lebih lama menyebabkan kadar air pada bahan menjadi lebih rendah. Respon kadar air belum menunjukkan titik stasioner.



Gambar 1. Plot Permukaan Parameter Respons Kadar Air

Torefaksi pada suhu tinggi (250 °C -300 °C) dalam waktu tertentu (15-20 menit) dapat mengubah suatu zat menjadi bahan semi arang (Gambar 1). Degradasi termal yang cepat dari komponen organik

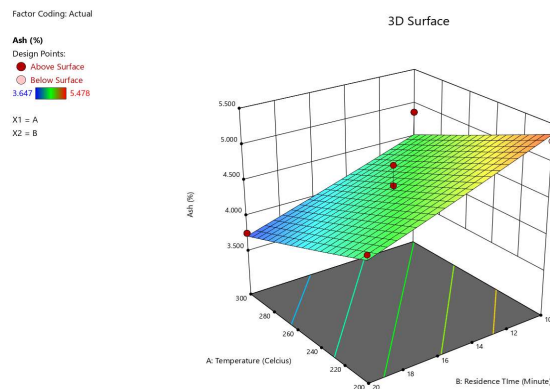
material pada suhu tinggi menghasilkan pembentukan residu arang dan perubahan kimia yang signifikan (El-Sayed et al., 2023). Temperatur torefaksi yang tinggi menyebabkan reaksi pirolisis, yang memerlukan pemecahan panas molekul organik yang rumit menjadi molekul yang lebih sederhana (Al-Haj Ibrahim, 2020).

Respon Kadar Abu

Model *RSM* untuk memaksimalkan temperatur dan waktu tinggal pada respon kadar abu ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\text{Kadar abu} = 4,52 - 0,3916 x_1 - 0,4382x_2 \quad 2)$$

Gambar 2 menunjukkan bagaimana penurunan kadar abu daun kesambi dapat dilakukan dengan menaikkan suhu torefaksi (250 °C-320 °C). Hal ini terjadi karena suhu yang lebih tinggi mempercepat proses degradasi dan penguapan sebagian besar mineral yang termasuk dalam biomassa. Penurunan produksi bahan organik mungkin juga terjadi bersamaan dengan penurunan kadar abu (Osman et al., 2023).



Gambar 2. Plot Permukaan Parameter Respon Kadar Abu

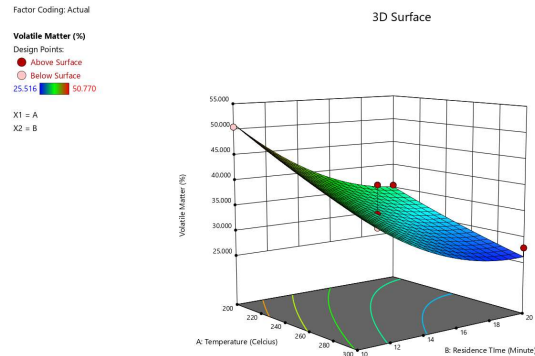
Kesambi mengandung lebih banyak abu setelah didiamkan lebih lama. Hal ini terjadi karena torefaksi yang berkepanjangan membuat biomassa terkena suhu tinggi dalam waktu yang lebih lama, yang menyebabkan mineral yang dikandungnya terurai lebih lambat dan meninggalkan lebih banyak abu. Suhu dan lamanya torefaksi juga dapat berdampak pada kadar abu daun kesambi. Laju pembakaran atau penguraian komponen organik pada daun dapat dipengaruhi oleh suhu dan lamanya torefaksi sehingga dapat berdampak pada kadar abu (Lyubov and Popova, 2017).

Respons Bahan Mudah Menguap

Persamaan 3 menyajikan model *RSM* untuk memaksimalkan suhu dan durasi tinggal respon bahan mudah menguap. Hasil model *RSM* disusun sedemikian rupa sehingga menunjukkan bahwa model tersebut bersifat kuadrat.

$$\text{Bahan mudah menguap} = 33,85 - 5,43 x_1 - 7,03 x_2 + 0,93 x_1 x_2 + 0,44 x_1^2 - 3,43 x_2^2 \quad 3)$$

Kandungan mudah menguap pada daun kesambi dapat diturunkan dengan menaikkan suhu torefaksi. Hal ini terjadi akibat lebih cepatnya disintegrasi komponen organik dalam biomassa pada suhu yang lebih tinggi, yang mengakibatkan penguapan gas yang mudah terbakar dan produksi biomassa yang lebih stabil (Gambar 3).



Gambar 3. Plot Permukaan Parameter Respon Zat Mudah Menguap

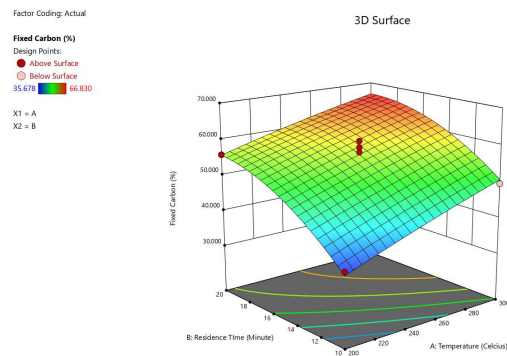
Kandungan bahan mudah menguap pada daun kesambi juga dapat diturunkan dengan cara memperpanjang lama tinggal. Memperpanjang waktu torefaksi pada suhu tinggi dapat meningkatkan kandungan bahan mudah menguap, namun melakukan torefaksi pada suhu rendah dapat menurunkan konsentrasi bahan mudah menguap (Basu, 2013).

Respons Karbon Tetap

Persamaan 4 menyajikan model *RSM* untuk memaksimalkan suhu dan durasi torefaksi dengan mempertimbangkan respon karbon tetap. Model menunjukkan kuadratik.

$$\text{Karbon tetap} = 56,65 + 6,51 x_1 + 9,04 x_2 - 0,99 x_1 x_2 - 0,49 x_1^2 - 4,02 x_2^2 \quad 4)$$

Kesambi mengandung lebih banyak karbon tetap ketika suhu torefaksi tinggi (Gambar 4). Hal ini terjadi karena biomassa dapat terurai lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi dan menghasilkan karbon tetap yang lebih stabil (Khairy et al., 2023).



Gambar 4. Plot Permukaan Parameter Respons Karbon Tetap

Kesambi memiliki lebih banyak karbon tetap akibat penguraian zat-zat yang mudah menguap pada suhu tinggi selama proses torefaksi. Komponen organik pada daun dihilangkan selama proses torefaksi, dan satu-satunya komponen organik yang tersisa hanyalah karbon tetap. Pirolisis lignin sangat dipengaruhi oleh torefaksi pada suhu 300 °C, dan lignin yang di torefaksi menghasilkan lebih banyak bahan kimia aromatik (Chen et al., 2019). Hubungan antara degradasi hemiselulosa dan kerapuhan produk torrefied adalah korelasi lain yang ditemukan (Strandberg et al., 2015).

Optimasi Respon Suhu dan Waktu Tingga

Tabel 3 mencantumkan persyaratan untuk menemukan suhu dan waktu torefaksi yang ideal. Meskipun parameter lainnya berada dalam rentang *RSM*, sasaran pengoptimalan yang dinyatakan adalah kadar air minimum dan kandungan karbon tetap maksimum. Fokus utama penelitian ini adalah pada parameter karbon tetap yang diharapkan dapat menghasilkan briket dengan nilai kalor yang tinggi.

Tabel 3. Standar Pemilihan Suhu Torefaksi Dan Waktu Tingga Yang Ideal

<i>Name</i>	<i>Goal</i>	<i>Lower Limit</i>	<i>Upper Limit</i>	<i>Lower Weigh t</i>	<i>Upper Weigh t</i>	<i>Importanc e</i>
x_1 :Suhu	is in range	200	300	1	1	3
x_2 :Waktu Tingga	is in range	10	20	1	1	3
Kadar air (%)	minimize	36.258	807.456	1	1	3
Abu (%)	is in range	36.471	54.781	1	1	3
Bahan mudah menguap (%)	is in range	255.164	507.696	1	1	3
Karbon tetap (%)	maximize	356.777	668.302	1	1	5

Berdasarkan nilai desirability terbesar 1 dan hasil *RSM* pada Tabel 4, maka kombinasi suhu dan lama torefaksi yang dipilih untuk verifikasi adalah suhu torefaksi 300 °C dengan waktu tingga 20 menit. Nilai parameter respon kadar abu sebesar 3.1230.315 untuk kadar air. Pada campuran terpilih suhu dan lama torefaksi diperoleh nilai parameter respon kadar air sebesar 3.1230.315, abu sebesar 3.690.184, bahan mudah menguap sebesar 26.1872.2, dan karbon tetap sebesar 66.6832.38.

Tabel 4. Solusi Optimasi Suhu Torefaksi Dan Waktu Tingga

No .	Suhu (°C)	Waktu tingga (menit)	Kada r Air	Ab u	Bahan mudah mengua p	Karbo n Tetap	<i>Desirabilit y</i>	
1	300	20	3,1	3,7	26	67	1	<i>Selected</i>
2	300	19,96	3,1	3,7	26	67	1	
3	300	19,84	3,2	3,7	26	67	1	

Verifikasi Respon

Kondisi terbaik untuk suhu dan durasi torefaksi ditemukan dengan menguji suhu torefaksi dan waktu tingga berdasarkan temuan prediksi *RSM* dan data yang dikonfirmasi oleh eksperimen

laboratorium (Tabel 10). Hasil verifikasi berada pada rentang *Prediction Interval* (PI) dan *Confidence Interval* (CI) 95%. Tabel 5 menampilkan nilai parameter respon untuk konsentrasi berikut: kadar air, abu, bahan mudah menguap, dan kandungan karbon tetap.

Verifikasi respon model suhu dan waktu tinggal torefaksi menggunakan suhu 300 °C dan waktu tinggal 20 menit menghasilkan kadar air sebesar 2,8% dan 4,72%, kadar abu sebesar 4,36% dan 3,69%, kadar bahan mudah menguap sebesar 4,36% dan 3,69%. 25,00% dan 25,147%, serta kandungan karbon tetap sebesar 66,45% dan 66,87%.

Tabel 5. Verifikasi Respon Model Suhu Torefaksi Dan Waktu Tinggal

<i>Solution 1 of 10 Response</i>	<i>Predicted Mean</i>	<i>Predicted Median</i>	<i>Observed</i>	<i>Std Dev</i>	<i>n</i>	<i>SE Pred</i>	<i>95% PI low</i>	<i>Data Mean</i>
Kadar Air	3.12	3.12	0,55	2	0,50	2.00	3.76	4.24
Abu	3.69	3.69	0,32	2	0,29	3.04	4.02	4.34
Bahan mudah menguap	26.19	26.19	2.79	2	2.95	19.20	25.08	33.17
Karbon Tetap	66.68	66.68	3.01	2	3.19	59.17	66.67	74.24

Kadar karbon tetap sebesar 66,67%, kadar bahan mudah menguap 25,08%, kadar abu 4,024%, dan kadar air 3,76%, berdasarkan temuan verifikasi parameter respon. Karena berada dalam kisaran prediksi, hasil pengujian menunjukkan bahwa model dapat memprediksi parameter respons kadar air, kadar abu, kadar bahan mudah menguap, dan kadar karbon tetap dengan akurat.

KESIMPULAN

Temuan-temuan berikut dapat diambil dari penelitian yang telah dilakukan: Kadar air, abu, bahan mudah menguap, dan kandungan karbon tetap semuanya dipengaruhi dengan cara yang berbeda-beda dengan meningkatkan suhu torefaksi dan durasi tinggal yang ideal. Torefaksi biomassa daun kesambi dapat dioptimalkan pada suhu torefaksi 300 °C dan waktu tinggal 20 menit, menghasilkan nilai parameter respon kadar air, kadar abu, kadar bahan mudah menguap, dan kadar karbon tetap berturut turut 3,76%, 4,02%, 25,08% dan 66,67%.

Daftar Pustaka

- Ajikashile, J. O., Alhnidi, M. J., Bishir, M., & Kruse, A. (2023). The influence of torrefaction temperature and reaction time on the properties of torrefied sun-dried millet and sorghum straws from the arid and semi-arid zones of western Africa. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(3), 751–767. <https://doi.org/10.1002/BBB.2464>
- Al-Haj Ibrahim, H. (2020). Introductory Chapter: Pyrolysis. In *Recent Advances in Pyrolysis*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90366>
- Basu, P. (2013). Torrefaction 4.1 INTRODUCTION. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*.

- Chen, W. H., Lin, B. J., Lin, Y. Y., Chu, Y. S., Ubando, A. T., Show, P. L., Ong, H. C., Chang, J. S., Ho, S. H., Culaba, A. B., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82, 100887. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2020.100887>
- Chen, W. H., Wang, C. W., Ong, H. C., Show, P. L., & Hsieh, T. H. (2019). Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*, 258, 116168. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.116168>
- Dirgantara, M., Karelius, Cahyana, B. T., Suastika, K. G., & Akbar, A. R. M. (2020). Effect of Temperature and Residence Time Torrefaction Palm Kernel Shell on the Calorific Value and Energy Yield. *Journal of Physics: Conference Series*, 1428(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1428/1/012010>
- El-Sayed, S. A., Khass, T. M., & Mostafa, M. E. (2023). Thermal degradation behaviour and chemical kinetic characteristics of biomass pyrolysis using TG/DTG/DTA techniques. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03926-2>
- Haseli, Y. (2019). Simplified model of torrefaction-grinding process integrated with a power plant. *Fuel Processing Technology*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.02.008>
- Idris, S. S., Zailan, M. I., Azron, N., & Rahman, N. A. (2021). Sustainable green charcoal briquette from food waste via microwave pyrolysis technique: Influence of type and concentration of binders on chemical and physical characteristics. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(3). <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.33101>
- Jifara Daba, B., & Mekuria Hailegiorgis, S. (2023). Torrefaction of corncob and khat stem biomass to enhance the energy content of the solid biomass and parametric optimization. *Bioresource Technology Reports*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101381>
- Khairy, M., Amer, M., Ibrahim, M., Ookawara, S., Sekiguchi, H., & Elwardany, A. (2023). The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03822-9>
- Kota, K. B., Shenbagaraj, S., Sharma, P. K., Sharma, A. K., Ghodke, P. K., & Chen, W. H. (2022). Biomass torrefaction: An overview of process and technology assessment based on global readiness level. *Fuel*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124663>
- Li, Y., & You, S. (2022). Biochar soil application: soil improvement and pollution remediation. In *Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85343-9.00004-5>
- Lyubov, V. K., & Popova, E. I. (2017). Drying and heat decomposition of biomass during the production of biochar. *Journal of Physics: Conference Series*, 891(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012268>
- Malak, K., De La Seiglière, C., Fernández, C., Swaminathan, M., Sebastián, A., & Arora, D. (2016). Green Coal: A New Energy Source from Leaves. *Energy Procedia*, 100, 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.207>
- Martín-Pascual, J., Jódar, J., Rodríguez, M. L., & Zamorano, M. (2020). Determination of the optimal operative conditions for the torrefaction of olive waste biomass. *Sustainability (Switzerland)*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/SU12166411>

- Medic, D. (2012). *Investigation of torrefaction process parameters and characterization of torrefied biomass*. <https://doi.org/10.31274/ETD-180810-220>
- Nunes, L. J. R., & Matias, J. C. O. (2020). Biomass torrefaction as a key driver for the sustainable development and decarbonization of energy production. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3), 1–9. <https://doi.org/10.3390/su12030922>
- Osman, A. I., Lai, Z. Y., Farghali, M., Yiin, C. L., Elgarahy, A. M., Hammad, A., Ihara, I., Al-Fatesh, A. S., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Optimizing biomass pathways to bioenergy and biochar application in electricity generation, biodiesel production, and biohydrogen production. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 21, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01613-2>
- Ozonoh, M., Oboirien, B. O., & Daramola, M. O. (2020). Optimization of process variables during torrefaction of coal/biomass/waste tyre blends: Application of artificial neural network & response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105808>
- Rasid, R. A., Chin, T. M., Ismail, M., & Rahman, R. N. U. A. (2019). Effect of Torrefaction Temperature, Residence Time and Particle Size on the Properties of Torrefied Food Waste. *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(3), 753–760. <https://doi.org/10.22146/IJC.39718>
- Ribeiro, J. M. C., Godina, R., Matias, J. C. de O., & Nunes, L. J. R. (2018). Future perspectives of biomass torrefaction: Review of the current state-of-the-art and research development. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/su10072323>
- Singh, S., Chakraborty, J. P., & Mondal, M. K. (2019). Optimization of process parameters for torrefaction of *Acacia nilotica* using response surface methodology and characteristics of torrefied biomass as upgraded fuel. *Energy*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115865>
- Tang, Y., Dong, J., Zhao, Y., Li, G., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., Nzihou, A., Luo, G., & Ye, C. (2022). Hydrogen-Rich and Clean Fuel Gas Production from Co-pyrolysis of Biomass and Plastic Blends with CaO Additive. *ACS Omega*, 7(41). <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04279>
- Thrän, D. (2016). *Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction* Project acronym: SECTOR Project title: Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction. www.sector-project.eu
- Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9, 462. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.728140/BIBTEX>
- Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudolfsson, M., & Nielsen, H. K. (2020). *Effect of Torrefaction on Properties of Pellets Produced from Woody Biomass*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02671>