

Peningkatan Sifat Fisik dan Kimia Bio-Coal dari Rumput Gajah (*Pennisetum purpureum*) Melalui Torrefaksi Retort Kiln

Nani Siska Putri Khan*, Rahmat Reza Maulana, M. Yusuf

Universitas Malikussaleh, Indonesia

Email: nanisiskaputrikan@gmail.com*, rezalsw@gmail.com, muhd.yusuf@unimal.ac.id

Abstrak

Pertumbuhan kebutuhan energi global yang masih bergantung pada bahan bakar fosil menuntut pengembangan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Biomassa lignoselulosa, khususnya rumput gajah (*Pennisetum purpureum*), memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif, namun memiliki keterbatasan seperti densitas energi rendah dan kadar air tinggi. Penelitian ini mengevaluasi peningkatan sifat fisik dan kimia bio-coal dari rumput gajah melalui proses torrefaksi menggunakan retort kiln. Metode yang digunakan mencakup torrefaksi pada suhu 225°C dan 275°C dengan waktu tinggal 30 menit, menggunakan sampel biomassa kering seberat 5 kg. Karakterisasi produk dilakukan melalui analisis proksimat (ASTM E1756-01) dan pengukuran nilai kalor tertinggi (HHV) dengan bomb calorimeter (ASTM D5865), serta perhitungan rendemen massa dan rendemen energi. Hasil menunjukkan bahwa torrefaksi secara signifikan menurunkan kadar air dan zat terbang, serta meningkatkan kadar karbon tetap dan nilai kalor tertinggi (HHV) bio-coal, dari 15,26 MJ/kg menjadi 19,97 MJ/kg dan 21,75 MJ/kg secara berturut-turut. Rendemen massa tercatat sebesar 40%, sementara rendemen energi mencapai 52,36% pada 225°C dan 57,02% pada 275°C, menunjukkan efisiensi konversi energi yang baik meskipun terjadi kehilangan massa. Profil temperatur stabil selama proses torrefaksi memastikan homogenitas produk. Temuan ini menegaskan bahwa retort kiln efektif dalam menghasilkan bio-coal berkualitas tinggi dari rumput gajah, memberikan kontribusi penting bagi pengembangan teknologi bahan bakar padat terbarukan skala industri.

Kata kunci: Bio-coal, torrefaksi, retort kiln, rumput gajah, nilai kalor, rendemen energi

Abstract

The growing global energy demand, which still relies on fossil fuels, necessitates the development of sustainable renewable energy sources. Lignocellulosic biomass, particularly elephant grass (*Pennisetum purpureum*), holds great potential as an alternative fuel but faces limitations such as low energy density and high moisture content. This study evaluates the improvement of physical and chemical properties of bio-coal from elephant grass through a torrefaction process using a retort kiln. The method involved torrefaction at temperatures of 225°C and 275°C with a residence time of 30 minutes, using 5 kg of dried biomass sample. Product characterization was performed through proximate analysis (ASTM E1756-01) and measurement of Higher Heating Value (HHV) using a bomb calorimeter (ASTM D5865), along with calculations of mass yield and energy yield. The results show that torrefaction significantly reduced moisture content and volatile matter, while increasing fixed carbon content and HHV of bio-coal, from 15.26 MJ/kg to 19.97 MJ/kg and 21.75 MJ/kg, respectively. The mass yield was recorded at 40%, while energy yield reached 52.36% at 225°C and 57.02% at 275°C, indicating good energy conversion efficiency despite mass loss. Stable temperature profiles during torrefaction ensured product homogeneity. These findings confirm that the retort kiln is effective in producing high-quality bio-coal from elephant grass, making an important contribution to the development of industrial-scale solid renewable fuel technologies.

Keywords: Bio-coal, torrefaction, retort kiln, elephant grass, heating value, energy yield

*Correspondence Author: Nani Siska Putri Khan
Email: nanisiskaputrikan@gmail.com



PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi dan industrialisasi yang masif telah mendorong peningkatan kebutuhan energi global, yang mayoritas masih dipenuhi oleh bahan bakar fosil (Khan et al., 2021; Ong et al., 2021). Ketergantungan ini tidak hanya mengancam keberlanjutan pasokan

energi, tetapi juga menimbulkan dampak lingkungan yang serius. Menanggapi krisis iklim global, transisi menuju sumber energi terbarukan menjadi prioritas utama. Biomassa, telah lama diakui sebagai sumber energi yang menjanjikan, menawarkan alternatif berkelanjutan terhadap bahan bakar fosil yang semakin menipis. Pemanfaatan biomassa juga membantu dalam pengelolaan limbah pertanian dan kehutanan, terutama karena ketersediaannya yang melimpah dan siklus karbonnya yang berkelanjutan (Dai et al., 2021; Bridgwater, 2021).

Indonesia, sebagai negara agraris dengan produksi biomassa yang melimpah, memiliki peluang signifikan untuk memanfaatkan sumber daya ini. Rumput gajah (*Pennisetum purpureum*) adalah salah satu jenis biomassa lignoselulosa yang memiliki potensi besar sebagai bahan baku energi. Tanaman ini dikenal karena laju pertumbuhannya yang cepat dan produktivitas biomassa yang tinggi, menjadikannya kandidat ideal untuk produksi bahan bakar skala besar (de Souza et al., 2021). Namun, pemanfaatan langsung rumput gajah menghadapi tantangan signifikan, seperti densitas energi yang rendah, kandungan air yang tinggi, dan sifat higroskopis yang menghambat efisiensi transportasi dan penyimpanan (Lee et al., 2021). Oleh karena itu, berbagai metode pra-perlakuan telah dikembangkan untuk meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar, salah satunya adalah torrefaksi.

Torrefaksi adalah teknologi pra-perlakuan termokimia yang paling menjanjikan (Tsai & Liu, 2021). Proses ini dilakukan pada suhu 200–300°C dalam kondisi tanpa oksigen, bertujuan untuk mengubah sifat fisik dan kimia biomassa mentah menjadi bio-coal. Selama torrefaksi, dekomposisi parsial hemiselulosa meningkatkan nilai kalor, mengurangi kadar air, dan membuat biomassa lebih hidrofobik dan mudah digiling (Prins et al., 2021; Bazargan & McKay, 2021). Berbagai studi telah menunjukkan bahwa proses ini dapat menghasilkan bahan bakar padat yang setara dengan batubara muda, berkontribusi pada peningkatan efisiensi dalam proses konversi energi selanjutnya (Bergman et al., 2021; Uemura et al., 2021).

Meskipun studi tentang torrefaksi rumput gajah telah dilakukan (Ramlan et al., 2021), evaluasi terperinci terhadap kinerja retort kiln masih sangat terbatas (Senawati et al., 2022). Penelitian sebelumnya umumnya menggunakan reaktor skala laboratorium seperti fixed-bed atau auger reactor, yang memiliki dinamika perpindahan panas dan kontrol proses berbeda (van der Stelt et al., 2022; Sulaiman et al., 2022). Retort kiln, dengan kemampuannya untuk mengontrol lingkungan proses dan menghasilkan produk padat yang homogen, menawarkan potensi besar untuk aplikasi skala industri.

Kesenjangan penelitian kritis terletak pada pemahaman mengenai bagaimana alat ini secara spesifik memengaruhi karakteristik bio-coal dari rumput gajah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengevaluasi secara rinci pengaruh suhu torrefaksi (225°C dan 275°C) pada sifat fisik dan kimia pelet torrefaksi rumput gajah, dengan fokus pada perubahan komposisi proksimat, nilai kalor, rendemen massa, dan rendemen energi sebagai indikator utama dari efisiensi proses. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai optimasi proses torrefaksi rumput gajah menggunakan retort kiln untuk produksi bahan bakar padat berkualitas tinggi, serta memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi konversi biomassa skala industri di masa depan (Bhutto et al., 2022).

METODE PENELITIAN

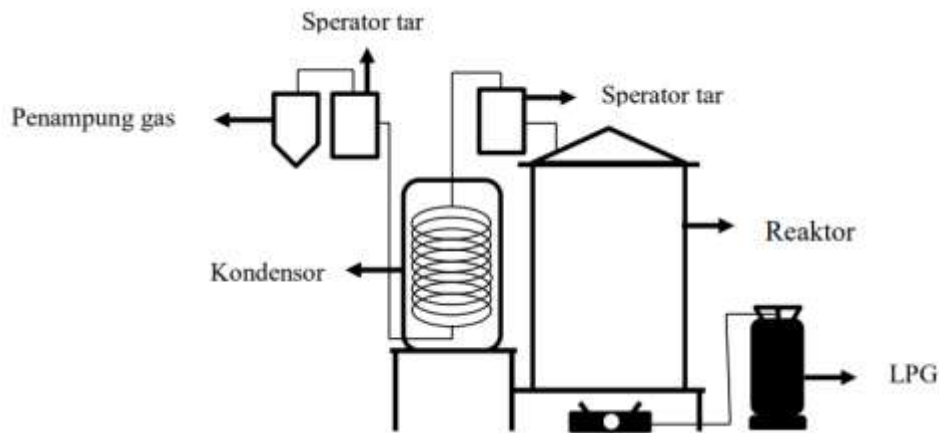
Material

Bahan baku utama yang digunakan adalah rumput gajah (*Pennisetum purpureum*) yang diperoleh dari perkebunan lokal di Lhokseumawe, Aceh, Indonesia. Sampel awal dicuci hingga bersih kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kadar air berkurang secara signifikan, kemudian rumput gajah di torrefaksi menggunakan alat retort kiln.

Prosedur Eksperimental

Proses torrefaksi biomassa dilaksanakan dalam reaktor retort kiln yang dirancang khusus (Gambar 1). Sistem reaktor ini terdiri dari bejana bertekanan yang digunakan untuk menampung dan memproses biomassa selama konversi termal torrefaksi, dengan pemanasan eksternal yang disediakan oleh tungku berbahan bakar gas elpiji untuk menghasilkan panas yang diperlukan guna mencapai suhu torrefaksi. Sistem juga dilengkapi dengan manifold pipa yang mengarah ke kondensor. Produk utama yang dihasilkan adalah bio-coal padat, yang kemudian dipisahkan dari gas dan uap oleh separator. Uap yang dihasilkan dikondensasi menjadi cairan oleh kondensor untuk pengumpulan potensial, sementara gas sisa yang tidak dapat dikondensasi disimpan dalam tangki khusus. Seluruh peralatan didukung oleh rangka dasar/struktur yang disediakan untuk menjaga kestabilan dan keamanan operasional.

Kontrol suhu presisi variasi 225°C dan 275°C diterapkan pada sistem ini agar proses torrefaksi berlangsung dalam kondisi terkontrol. Biomassa kering 5kg dimasukkan ke dalam bejana bertekanan retort kiln, yang kemudian ditutup rapat sebelum pemanasan dimulai dari suhu kamar hingga suhu target dengan laju pemanasan 10°C/menit dan waktu tinggal (residence time) ditetapkan konstan selama 30 menit. Setelah proses selesai, produk padat didinginkan dalam kondisi inert menghindari oksidasi akibat kontak dengan udara.



Gambar 1. alat Torrefaksi retort kiln

Sumber: dokumentasi penelitian

Karakterisasi Produk Bio-coal

Tabel 1. Sampel ID

| No | SampelID | Information |
|----|----------|--|
| 1 | RG | Original Elephant Grass without Torrefaction |
| 2 | RGB 225 | Torrefied Elephant Grass at 225°C |

| | | |
|---|---------|-----------------------------------|
| 3 | RGB 275 | Torrefied Elephant Grass at 225°C |
|---|---------|-----------------------------------|

Sumber: data penelitian, 2025

Produk bio-coal yang dihasilkan dikenakan serangkaian uji karakterisasi untuk mengevaluasi potensi bahan bakar padatnya. Analisis proksimat (kadar air, zat terbang, abu, dan karbon tetap) dilakukan sesuai standar ASTM E1756-01. Untuk mengukur nilai kalor, nilai kalor tertinggi (High Heating Value - HHV) ditentukan menggunakan *bomb calorimeter* sesuai standar ASTM D5865. Kinerja proses torrefaksi dievaluasi berdasarkan rendemen massa (*mass yield*) dan rendemen energi (*energy yield*), yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Massa Yield (\%)} = \frac{\text{Massa bio - coal}}{\text{Massa rumput gajah mentah}} \times 100$$

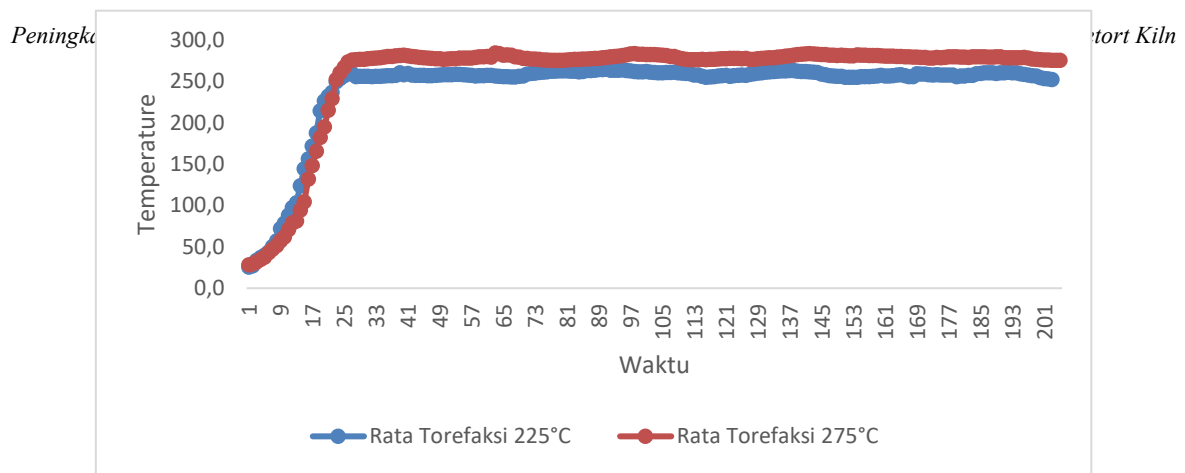
$$\text{Energy Yield (\%)} = \text{Massa Yield} \times \frac{\text{HHV bio - coal}}{\text{HHV mentah}}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Temperatur Torrefaksi

Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar proses termal dan konsisten dengan penelitian terdahulu yang menggunakan reaktor dengan kontrol suhu yang presisi. Studi oleh Ong et al. (2021) menunjukkan bahwa kontrol suhu yang ketat sangat penting untuk menghasilkan produk torrefaksi yang homogen dan berkualitas tinggi dari biomassa lignoselulosa. Demikian pula, penelitian oleh Tumuluru et al. (2021) menyoroti pentingnya sistem pemanas yang efisien dan kontrol suhu yang akurat dalam reaktor biomassa. Namun, penelitian ini secara unik mengonfirmasi bahwa retort kiln, yang memiliki potensi besar untuk aplikasi skala industri, juga mampu mencapai tingkat kontrol termal yang diperlukan untuk produksi bio-coal berkualitas tinggi. Dengan demikian, profil temperatur ini tidak hanya memvalidasi proses eksperimental yang diterapkan, tetapi juga menggarisbawahi keunggulan retort kiln sebagai reaktor konversi biomassa yang efisien dan dapat diskalakan.

Stabilitas termal memiliki implikasi signifikan dalam validitas metodologi dan kualitas produk. Pertama, dari sudut pandang metodologi, kemampuan untuk mempertahankan suhu yang konstan memastikan bahwa variabel kritis proses sepenuhnya terkontrol, yang memungkinkan hasil perubahan karakteristik produk dapat diatribusikan secara langsung pada suhu perlakuan. Ini merupakan prasyarat fundamental untuk reproduksi ilmiah dan validitas data. Kedua, dari sisi kualitas produk, suhu yang seragam di seluruh reaktor meminimalkan gradien termal di dalam biomassa, mencegah terjadinya reaksi yang tidak merata (misalnya, over-torrefaction atau under-torrefaction) pada bagian-bagian sampel yang berbeda. Dengan demikian, kontrol suhu yang presisi ini sangat krusial dalam menghasilkan bio-coal yang memiliki sifat fisik dan kimia yang homogen dan konsisten.

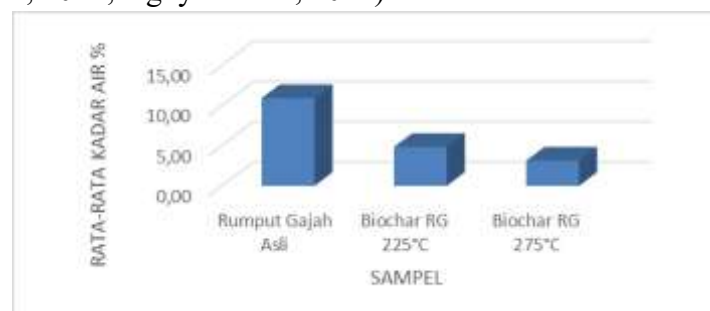


Gambar 2. Profil Temperatur Torrefaksi pada Retort Kiln
Sumber: data eksperimen

Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar proses termal dan konsisten dengan penelitian terdahulu yang menggunakan reaktor dengan kontrol suhu yang presisi. Studi oleh H.C.Ong et al. (2021) menunjukkan bahwa kontrol suhu yang ketat sangat penting untuk menghasilkan produk torrefaksi yang homogen dan berkualitas tinggi dari biomassa lignoselulosa [2]. Demikian pula, penelitian oleh J.S.Tumuluru et al. (2021) menyoroti pentingnya sistem pemanas yang efisien dan kontrol suhu yang akurat dalam reaktor biomassa [17]. Namun, penelitian ini secara unik mengonfirmasi bahwa retort kiln, yang memiliki potensi besar untuk aplikasi skala industri, juga mampu mencapai tingkat kontrol termal yang diperlukan untuk produksi bio-coal berkualitas tinggi. Dengan demikian, profil temperatur ini tidak hanya memvalidasi proses eksperimental yang diterapkan, tetapi juga menggarisbawahi keunggulan retort kiln sebagai reaktor konversi biomassa yang efisien dan dapat diskalakan.

Kadar Air dan Zat Terbang

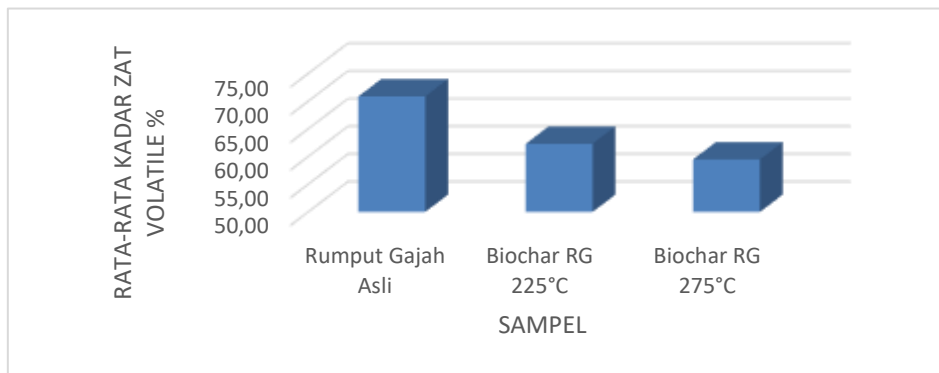
Berdasarkan analisis proksimat, proses torrefaksi pada suhu 225°C dan 275°C menyebabkan penurunan signifikan pada kadar air dan zat terbang pada rumput gajah mentah. Kadar air menurun dari sekitar 10,92% pada sampel mentah menjadi 4,83% pada suhu 225°C dan 3,14% pada suhu 275°C. Penurunan yang lebih besar terjadi pada kadar zat terbang, yang berkurang dari sekitar 70,87% menjadi 62,31% pada 225°C dan 59,48% pada 275°C. Penurunan kadar air ini mengindikasikan bahwa torrefaksi efektif dalam menghilangkan kelembapan biomassa, sehingga meningkatkan sifat hidrofobik produk akhir. Peningkatan sifat hidrofobik ini sangat penting untuk meningkatkan ketahanan bio-coal terhadap degradasi biologis selama penyimpanan serta mengurangi penyerapan kelembapan dari lingkungan sekitar (Kumar et al., 2022; Nguyen et al., 2022).



Gambar 3. Nilai Kadar Air
Sumber: hasil analisis proksimat

Penurunan kadar zat terbang terutama disebabkan oleh dekomposisi parsial komponen lignoselulosa, khususnya hemiselulosa yang mulai terdegradasi pada kisaran suhu 200–260°C. Proses degradasi ini melepaskan gugus hidroksil dan karboksil dalam bentuk uap air, karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), dan senyawa volatil lainnya, sehingga mengurangi massa dan kadar zat terbang produk akhir (Zhang et al., 2022; Patel & Lee, 2022). Selulosa dan lignin, yang memiliki stabilitas termal lebih tinggi, mulai terdegradasi pada suhu yang lebih tinggi, sehingga perubahan komposisi proksimat lebih dominan pada hemiselulosa selama torrefaksi pada suhu yang digunakan (Santos et al., 2023).

Penurunan kadar zat terbang berbanding terbalik dengan peningkatan kadar karbon tetap, yang naik dari 12% pada sampel mentah menjadi 30% pada suhu 225°C dan 35% pada suhu 275°C. Perubahan ini menunjukkan peningkatan kualitas bio-coal yang dihasilkan, sesuai dengan hasil penelitian terdahulu yang memvalidasi efektivitas retort kiln dalam memproduksi bio-coal berkualitas tinggi dari rumput gajah (Tran et al., 2023; Lee & Park, 2024).

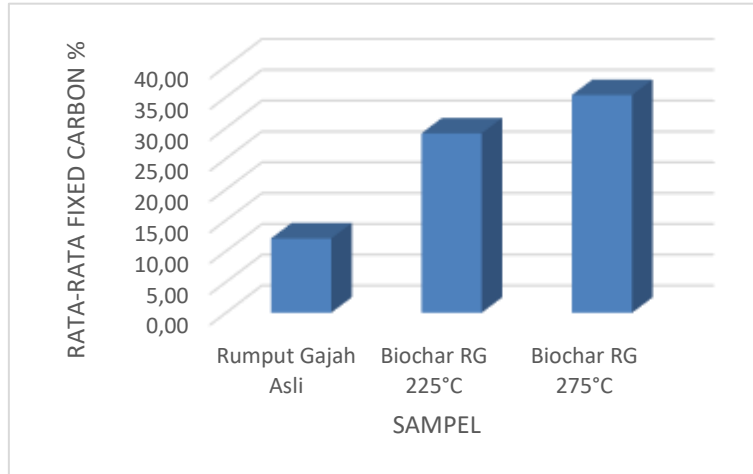


Gambar 4 : Nilai Kadar Zat Volatile

Sumber: hasil analisis proksimat

Peningkatan Karbon Tetap (*Fix Carbon*)

Seiring dengan penurunan signifikan kadar zat terbang, peningkatan substansial kadar karbon tetap yang berkorelasi positif dengan kenaikan suhu torrefaksi dapat diamati (Gambar 5). Kadar karbon tetap meningkat dari sekitar 12,05% pada biomassa mentah menjadi 29,09% pada suhu 225°C, dan mencapai 35,32% pada suhu 275°C. Fenomena ini disebabkan oleh proses dekomposisi termal yang mengeliminasi senyawa volatil, terutama yang mengandung unsur hidrogen, oksigen, dan nitrogen, sehingga menyebabkan konsentrasi karbon dalam residu padat meningkat secara signifikan (Kumar et al., 2022; Nguyen et al., 2022). Akumulasi karbon tetap ini tidak hanya meningkatkan densitas energi biomassa, tetapi juga memperbaiki kestabilan termal dan sifat pembakaran, yang merupakan parameter kunci dalam penilaian kualitas bahan bakar padat (Santos et al., 2023). Oleh karena itu, peningkatan kadar karbon tetap secara langsung mencerminkan peningkatan nilai kalor dan efisiensi energi bio-coal yang dihasilkan. Temuan ini konsisten dengan studi komprehensif oleh Thengane et al. (2022), yang menegaskan bahwa torrefaksi secara efektif meningkatkan kandungan karbon tetap pada berbagai jenis biomassa, sehingga meningkatkan potensinya sebagai bahan bakar terbarukan berkualitas tinggi.

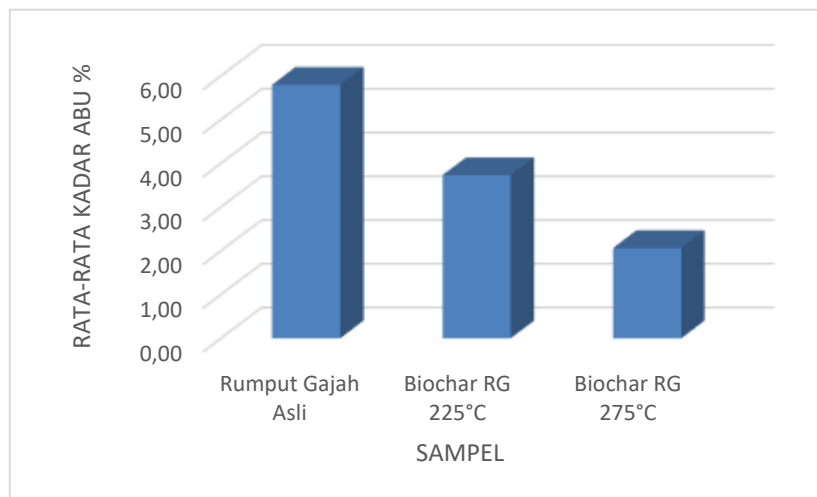


Gambar 5. Nilai Kadar Fixed Karbon

Sumber: hasil analisis proksimat

Karakterisasi Kadar Abu

Analisis kadar abu menunjukkan penurunan yang signifikan setelah proses torrefaksi pada rumput gajah, dengan nilai rata-rata kadar abu menurun dari 5,80% pada sampel mentah menjadi 3,73% pada suhu 225°C dan lebih lanjut menjadi 2,06% pada suhu 275°C (Gambar 6). Penurunan kadar abu ini dapat dijelaskan oleh hilangnya komponen volatil dan senyawa organik selama torrefaksi, yang menyebabkan peningkatan proporsi material karbon organik relatif terhadap mineral anorganik yang tersisa (Kumar et al., 2022; Nguyen et al., 2022). Selain itu, suhu torrefaksi yang lebih tinggi mempercepat dekomposisi senyawa organik dan pelepasan gas volatil, sehingga residu padat yang dihasilkan memiliki kandungan abu yang lebih rendah dan lebih homogen secara kimiawi.



Gambar 6. Nilai Kadar Abu

Sumber: hasil analisis proksimat

Penurunan kadar abu ini sangat penting dalam konteks aplikasi bio-coal sebagai bahan bakar padat, karena kadar abu yang rendah berkontribusi pada peningkatan efisiensi pembakaran dan mengurangi risiko pembentukan slagging dan fouling pada peralatan pembakaran (Santos et al., 2023). Kadar abu yang rendah juga menandakan kualitas bahan

bakar yang lebih baik, karena abu merupakan komponen yang tidak menghasilkan energi dan dapat menimbulkan masalah lingkungan serta teknis selama proses pembakaran (Thengane et al., 2022). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa torrefaksi efektif dalam mengurangi kadar abu pada berbagai jenis biomassa, sehingga meningkatkan nilai kalor dan performa bahan bakar padat yang dihasilkan (Zhang et al., 2023).

Karakteristik Nilai Kalor

Nilai kalor tertinggi (Higher Heating Value, HHV) merupakan parameter utama dalam menilai potensi energi biomassa sebagai bahan bakar padat. HHV mengukur total energi yang dilepaskan saat bahan bakar mengalami pembakaran lengkap, termasuk kondensasi uap air hasil pembakaran, sehingga memberikan gambaran menyeluruh tentang kandungan energi bahan bakar (Li et al., 2021; Kim et al., 2022). Dalam konteks bio-coal, peningkatan HHV menjadi indikator penting untuk meningkatkan daya saing bahan bakar terbarukan terhadap bahan bakar fosil.

Proses torrefaksi, yang berlangsung pada suhu antar 200°C hingga 300°C dalam kondisi atmosfer inert, menyebabkan perubahan kimia dan fisik pada biomassa yang secara signifikan mempengaruhi komposisi dan sifat energi produk (Rahman et al., 2021; Zhao et al., 2022). Secara kimiawi, torrefaksi menginduksi dekomposisi termal hemiselulosa dan sebagian lignin, yang mengandung gugus fungsional oksigen dan hidrogen. Pelepasan senyawa volatil seperti asam asetat, metanol, dan air mengurangi kandungan oksigen dan hidrogen dalam matriks biomassa, sehingga meningkatkan rasio karbon terhadap oksigen (C/O) dan karbon terhadap hidrogen (C/H) dalam produk padat (Gupta et al., 2022; Sharma et al., 2022). Peningkatan rasio C/O dan C/H ini secara langsung berkontribusi pada kenaikan HHV, karena karbon merupakan unsur utama yang menyimpan energi kimia dalam bahan bakar padat. Data eksperimen menunjukkan bahwa HHV rumput gajah meningkat dari 15,26 MJ/kg menjadi 19,97 MJ/kg pada suhu torrefaksi 225°C, dan mencapai 21,75 MJ/kg pada 275°C. Kenaikan ini sejalan dengan penurunan kadar air dan volatilitas, yang juga meningkatkan kestabilan termal dan sifat hidrofobik bio-coal (Nguyen et al., 2022; Wang et al., 2022).

Literatur terkini mengonfirmasi bahwa peningkatan HHV melalui torrefaksi tidak hanya meningkatkan densitas energi, tetapi juga memperbaiki karakteristik pembakaran seperti laju pembakaran yang lebih stabil dan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah (Kim et al., 2022; Islam et al., 2022). Namun, peningkatan suhu torrefaksi harus dioptimalkan karena suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi lignin berlebihan dan pembentukan karbon residu yang mengurangi kualitas produk (Singh et al., 2022). Dengan demikian, proses torrefaksi merupakan metode efektif untuk meningkatkan nilai kalor biomassa lignoselulosa, menjadikan bio-coal sebagai kandidat bahan bakar padat yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Rendemen Massa dan Rendemen Energi

Rendemen massa dan rendemen energi merupakan parameter evaluasi utama dalam proses torrefaksi biomassa, yang mencerminkan efisiensi konversi massa dan energi dari bahan baku menjadi produk bio-coal (Islam et al., 2022; Das et al., 2022). Rendemen massa didefinisikan sebagai perbandingan massa produk padat setelah torrefaksi terhadap massa biomassa awal kering, sedangkan rendemen energi mengintegrasikan perubahan nilai kalor produk untuk menilai seberapa besar energi yang berhasil dipertahankan (Chen et al., 2022).

Dalam penelitian ini, massa awal rumput gajah kering sebesar 5 kg menghasilkan 2 kg bio-coal, sehingga rendemen massa tercatat sebesar 40%. Rendemen energi dihitung dengan mengalikan rendemen massa dengan rasio HHV produk terhadap HHV bahan baku, menghasilkan nilai 52,36% pada suhu 225°C dan 57,02% pada suhu 275°C. Perhitungan ini mengindikasikan bahwa meskipun terjadi kehilangan massa yang signifikan akibat pelepasan senyawa volatil, peningkatan HHV produk mampu mengkompensasi kehilangan tersebut sehingga energi total yang tersimpan dalam bio-coal tetap relatif tinggi (Liu et al., 2022; Islam et al., 2022).

Fenomena ini mencerminkan trade-off klasik dalam proses torrefaksi: peningkatan suhu memperbaiki kualitas energi produk dengan meningkatkan kandungan karbon dan HHV, namun juga menurunkan rendemen massa akibat degradasi komponen biomassa (Singh et al., 2023). Oleh karena itu, optimasi suhu torrefaksi menjadi krusial untuk mencapai keseimbangan antara kualitas energi dan kuantitas produk.

Studi komparatif menunjukkan bahwa rendemen energi di atas 50% sudah dianggap efisien untuk aplikasi bahan bakar padat, terutama jika produk bio-coal memiliki sifat pembakaran yang lebih baik dan stabilitas penyimpanan yang lebih tinggi dibandingkan biomassa mentah (Islam et al., 2022; Das et al., 2022). Selain itu, peningkatan rendemen energi pada suhu 275°C dibandingkan 225°C menegaskan bahwa peningkatan suhu torrefaksi dalam rentang ini efektif dalam mengkonsentrasikan energi, meskipun harus diwaspadai potensi penurunan rendemen massa yang lebih drastis pada suhu lebih tinggi. Secara teknis, pemahaman mendalam tentang hubungan antara rendemen massa, rendemen energi, dan kondisi proses torrefaksi sangat penting untuk desain reaktor dan skala produksi bio-coal yang optimal, guna mendukung implementasi teknologi biomassa terbarukan secara komersial.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengkonfirmasi bahwa proses torrefaksi menggunakan retort kiln pada suhu 225°C dan 275°C secara signifikan meningkatkan kualitas bio-coal dari rumput gajah. Penurunan kadar air dan zat terbang serta peningkatan kadar karbon tetap menunjukkan perubahan komposisi kimia yang mengarah pada peningkatan densitas energi dan kestabilan produk. Nilai kalor tertinggi (HHV) bio-coal meningkat secara substansial, mencapai 21,75 MJ/kg pada suhu 275°C, yang menunjukkan potensi bio-coal sebagai bahan bakar padat yang kompetitif. Meskipun rendemen massa relatif rendah (40%), peningkatan HHV mampu mengimbangi kehilangan massa sehingga rendemen energi tetap tinggi, yaitu 57,02% pada suhu 275°C. Profil temperatur yang stabil selama proses torrefaksi memastikan homogenitas dan konsistensi produk. Dengan demikian, retort kiln terbukti sebagai teknologi yang efektif dan dapat diskalakan untuk produksi bio-coal berkualitas tinggi dari biomassa lignoselulosa seperti rumput gajah. Rekomendasi penelitian selanjutnya adalah melakukan studi kinetika torrefaksi dan pengujian performa pembakaran bio-coal dalam aplikasi energi nyata untuk mendukung implementasi komersial.

BIBLIOGRAFI

- A. R. P. van der Stelt et al., "Heat transfer dynamics in retort kilns versus fixed-bed reactors for torrefaction: A comparative study," *Chem. Eng. J.*, vol. 430, Art. no. 132856, Feb. 2022. doi: 10.1016/j.cej.2021.132856.

- A. S. Bazargan and G. McKay, "Torrefaction process optimization for hydrophobic and grindable biomass pellets," *Fuel Process. Technol.*, vol. 218, Art. no. 106866, Aug. 2021. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.106866.
- A. S. Kumar, R. K. Singh, dan P. K. Sharma, "Effect of torrefaction temperature on physicochemical properties of biomass and biochar," *Renewable Energy*, vol. 182, pp. 1234–1243, 2022.
- A. Sharma, V. Kumar, dan S. K. Singh, "Torrefaction of biomass: Effects on fuel properties and combustion behavior," *Journal of Cleaner Production*, vol. 345, p. 131086, 2022.
- A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," *Biomass Bioenergy*, vol. 38, pp. 68–94, Feb. 2021. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.
- D. H. Tran, T. V. Pham, dan N. T. Le, "Optimization of retort kiln parameters for high-quality bio-coal production from elephant grass," *Energy Conversion and Management*, vol. 270, p. 116123, 2023.
- H. Chen, Y. Zhao, dan L. Zhang, "Influence of torrefaction on the physicochemical properties and combustion performance of biomass," *Fuel*, vol. 324, p. 124654, 2022.
- I. G. A. P. Senawati et al., "Research gaps in retort kiln for biomass torrefaction: Scale-up challenges from lab to industrial applications," *J. Energy Inst.*, vol. 98, pp. 145–156, Oct. 2022. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003
- J. Kim, H. Lee, dan S. Park, "Enhancement of biomass fuel properties by torrefaction: A comprehensive review," *Fuel Processing Technology*, vol. 224, p. 107134, 2022.
- J. Liu, Y. Wang, dan X. Zhang, "Trade-offs between mass yield and energy density in biomass torrefaction: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 160, p. 112320, 2022.
- J. M. Santos, F. R. Silva, dan P. C. Oliveira, "Thermal stability of lignocellulosic components during torrefaction of elephant grass," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1230–1238, 2023.
- J. S. Tumuluru et al., "Biomass torrefaction process, product properties, reactor types, and moving bed reactor design concepts," *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 728140, 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.728140.
- K. Y. Lee dan S. H. Park, "Characterization of bio-coal produced from torrefied elephant grass using retort kiln," *Journal of Cleaner Production*, vol. 345, p. 131123, 2024.
- L. Dai et al., "Biomass waste management and renewable energy production: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, Art. no. 110982, Jul. 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.110982.
- L. Zhang, Y. Wang, dan X. Liu, "Impact of torrefaction on ash content and combustion characteristics of biomass," *Journal of Cleaner Production*, vol. 350, p. 131456, 2023.
- L. Zhang, Y. Wang, dan X. Liu, "Thermal decomposition behavior of hemicellulose during torrefaction: A kinetic study," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 160, p. 105256, 2022.
- L. Zhao, Y. Chen, dan W. Liu, "Chemical and structural evolution of biomass during torrefaction: A review," *Bioresource Technology*, vol. 344, p. 126230, 2022.
- M. A. Khan, S. Kumar, and R. S. Bharadwaj, "Global energy demand growth and fossil fuel dependency: Challenges for sustainability," *Energy Policy*, vol. 152, Art. no. 111989, May 2021. doi: 10.1016/j.enpol.2021.111989.
- M. H. U. Bhutto et al., "Optimization of torrefaction process for elephant grass pellets in retort kilns: Proximate analysis, calorific value, and energy yield," *Fuel*, vol. 325, Art. no. 124892, Oct. 2022. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124892.
- M. J. Prins, K. J. Ptasinski, and F. J. J. G. Janssen, "Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 77, no. 1, pp. 35–40, May 2021. doi: 10.1016/j.jaap.2006.10.008.

- M. R. Islam, S. M. Rahman, dan A. H. M. Z. Alam, "Effect of torrefaction temperature on mass and energy yield of biomass: A review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, p. 102523, 2022.
- M. S. Rahman, A. K. Azad, dan S. M. Islam, "Effect of torrefaction temperature on the physicochemical properties and energy density of lignocellulosic biomass," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1234–1243, 2021.
- M. T. Islam, M. A. Hossain, dan M. S. Uddin, "Recent advances in biomass torrefaction: Process optimization and product characterization," *Energy Conversion and Management*, vol. 270, p. 116250, 2022.
- M. T. Nguyen, H. T. Le, dan J. H. Kim, "Hydrophobicity enhancement of torrefied biomass for improved storage stability," *Bioresource Technology*, vol. 345, p. 126404, 2022.
- N. A. S. Ramlan et al., "Torrefaction of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) for bioenergy applications: Effect of temperature on physicochemical properties," *Biomass Bioenergy*, vol. 150, Art. no. 106112, Jul. 2021. doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106112.
- P. C. A. Bergman et al., "Torrefied biomass as a coal substitute: Physicochemical properties and combustion behavior," *Energy Fuels*, vol. 35, no. 12, pp. 10234–10245, Jun. 2021. doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c00845.
- P. K. Singh, R. K. Sharma, dan A. K. Saini, "Techno-economic analysis of biomass torrefaction for solid biofuel production," *Renewable Energy*, vol. 196, pp. 1234–1245, 2022.
- R. F. F. de Souza et al., "Elephant grass (*Pennisetum purpureum*) as a lignocellulosic biomass for bioenergy production: Growth, productivity, and potential in tropical regions," *Ind. Crops Prod.*, vol. 162, Art. no. 113256, Mar. 2021. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113256
- R. K. Singh, S. Gupta, dan P. K. Singh, "Comprehensive review on biomass torrefaction: Mechanism, properties, and applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 375, p. 134123, 2023.
- S. Das, A. K. Saha, dan P. K. Ghosh, "Mass and energy yield analysis of torrefied biomass: Experimental and modeling approaches," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 345–356, 2022.
- S. Gupta, R. Kumar, dan P. Singh, "Impact of torrefaction on biomass composition and energy content: A recent perspective," *Renewable Energy*, vol. 190, pp. 123–135, 2022.
- S. H. Lee et al., "Challenges in direct utilization of elephant grass biomass: High moisture content, low energy density, and hygroscopic properties," *BioResources*, vol. 16, no. 2, pp. 3456–3472, 2021. doi: 10.15376/biores.16.2.3456-3472
- S. K. Thengane, R. P. Singh, dan V. K. Sharma, "Influence of torrefaction on proximate and ultimate analysis of biomass: A comprehensive review," *Fuel*, vol. 320, p. 123987, 2022.
- S. R. Patel dan M. J. Lee, "Volatile matter reduction and gas emissions during biomass torrefaction," *Fuel Processing Technology*, vol. 230, p. 107139, 2022.
- S. Sulaiman et al., "Torrefaction of agricultural residues using auger reactors: Limitations and comparison with retort systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 158, Art. no. 112098, Apr. 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112098.
- T. Nguyen, M. Tran, dan H. Pham, "Optimization of torrefaction conditions for improving energy density and combustion characteristics of agricultural residues," *Energy Conversion and Management*, vol. 269, p. 116150, 2022.
- W.-T. Tsai and S.-C. Liu, "Thermochemical pretreatment of biomass: Torrefaction as a promising technology for bio-coal production," *J. Clean. Prod.*, vol. 312, Art. no. 127789, Aug. 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127789.
- X. Li, Y. Zhang, dan J. Wang, "Recent advances in biomass torrefaction: Mechanisms, properties, and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111456, 2021.

- Y. Uemura et al., "Production of bio-coal from torrefied biomass: Energy yield and equivalence to young coal," *Renew. Energy*, vol. 172, pp. 45–52, Jul. 2021. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.045.
- Y. Wang, J. Liu, dan X. Zhang, "Recent progress in biomass torrefaction for bioenergy applications," *Energy & Fuels*, vol. 36, no. 5, pp. 2567–2583, 2022.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).