

Pengaruh Variasi Temperatur Torefaksi terhadap Karakteristik *Wood Pellet* dari Limbah Furnitur Kayu Campuran

Agus Apriyanto^{1*}, Amrul², Hadi Prayitno³, Hanifah Nurjanah Iskandar⁴

¹Prodi Teknologi Rekayasa Otomotif, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Lampung
Jl. Soekarno-Hatta No.10 Kota Bandar Lampung, Lampung, Indonesia.

^{2,3,4}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro No.1 Kota Bandar Lampung, Lampung, Indonesia

*Corresponding author: agusapriyanto@polinela.ac.id

Abstract

This study aims to evaluate the effect of torrefaction process on wood pellets made from mixed furniture waste on the calorific value and chemical properties of the samples. Wood pellet samples consisting of 80% hardwood (Meranti, Merbau, Ulin, Mahogany, Keruing) and 20% softwood (Sengon, Pinus), were processed through torrefaction at temperatures of 250°C, 275°C, and 300°C for 30 minutes. Calorific value testing was carried out to determine the increase in energy, and proximate and ultimate analysis were carried out to determine changes in chemical properties. The results showed that the calorific value increased significantly after the torrefaction process, with the highest increase at a temperature of 300°C reaching 5.161 kcal/kg or an increase of about 32.3% compared to the initial calorific value of 3.902 kcal/kg. The proximate test showed an increase in fixed carbon and ash content, as well as a decrease in water and volatile substances. The ultimate test showed an increase in carbon content of up to 60.19% and a decrease in oxygen content of up to 26.61% at a temperature of 300°C. In addition, torrefaction increased the hydrophobicity of wood pellets, as evidenced by higher resistance to water immersion. Based on these results, it can be concluded that torrefaction at high temperatures (300°C) effectively improves the energy quality and stability of wood pellets, making it a more efficient and moisture-resistant biomass fuel alternative.

Keywords: wood pellet, torrefaction, mass yield, energy yield, calorific value, hydrophobic.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh proses torefaksi pada *wood pellet* berbahan limbah furniture campuran terhadap nilai kalor dan sifat kimia sampel. Sampel *wood pellet* terdiri dari 80% kayu keras (Meranti, Merbau, Ulin, Mahoni, Keruing) dan 20% kayu lunak (Sengon, Pinus), diproses melalui torefaksi pada temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C selama 30 menit. Pengujian nilai kalor dilakukan untuk menentukan peningkatan energi, dan analisis proximate serta ultimate dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat kimia. Hasil menunjukkan bahwa nilai kalor meningkat secara signifikan setelah proses torefaksi, dengan peningkatan tertinggi pada temperatur 300°C mencapai 5.161 kkal/kg atau naik sekitar 32,3% dibandingkan nilai kalor awal 3.902 kkal/kg. Uji proximate menunjukkan peningkatan kandungan karbon tetap dan abu, serta penurunan kadar air dan zat volatil. Uji ultimate menunjukkan peningkatan kadar karbon hingga 60,19% dan penurunan kadar oksigen hingga 26,61% pada temperatur 300°C. Selain itu, torefaksi meningkatkan sifat hidrofobik *wood pellet*, terbukti dari ketahanan terhadap perendaman air yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa torefaksi pada temperatur tinggi (300°C) secara efektif meningkatkan kualitas energi dan kestabilan wood pellet, menjadikannya alternatif bahan bakar biomassa yang lebih efisien dan tahan terhadap kelembapan.

Kata kunci: wood pellet, torefaksi, mass yield, energi yield, nilai kalor, hidrofobik.

1. Pendahuluan

Dalam beberapa dekade terakhir, perubahan iklim dan berkurangnya sumber daya energi fosil telah dianggap sebagai isu global yang semakin mendesak. Untuk mengatasi tantangan ini, energi terbarukan, terutama biomassa, mulai banyak dimanfaatkan sebagai alternatif guna memenuhi kebutuhan energi yang terus

meningkat. Biomassa merupakan sumber energi terbarukan namun memiliki beberapa kelemahan, seperti nilai kalor rendah, kepadatan rendah, higroskopis, tidak mudah digiling, dan masalah kadar abu [1] [2] [3]. Biomassa yang berasal dari bahan organik, seperti tanaman dan residu hewan, dapat diolah menjadi berbagai bentuk energi, termasuk biofuel dan bahan bakar biomassa padat seperti *wood pellet*. Seiring

meningkatnya permintaan global akan energi ramah lingkungan, potensi *wood pellet* sebagai sumber energi terbarukan semakin banyak diteliti. Produksi *wood pellet* di Indonesia telah mencapai 249.861,6 ton/m³ pada tahun 2023 [4].

Penelitian terkait *wood pellet* telah banyak dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. *Wood pellet* diproduksi dengan memadatkan kayu atau limbah kayu menjadi butiran berbentuk silinder dengan diameter sekitar 0,6-1 cm dan panjang 1-3 cm, serta memiliki kerapatan rata-rata sekitar 650 kg/m³. Namun, kelemahan utama *wood pellet* adalah densitas energi yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil serta sifat hidrofobiknya yang lemah, sehingga mudah menyerap air dan mengembang [5]. Untuk mengatasi kelemahan ini, berbagai metode peningkatan kualitas *wood pellet* telah dikembangkan, salah satunya adalah teknologi torefaksi. Torefaksi dilakukan dengan perlakuan termokimia pada suhu 200–300°C dalam kondisi oksigen rendah atau tanpa oksigen, yang bertujuan untuk meningkatkan densitas energi dan stabilitas penyimpanan *wood pellet* [6].

Beberapa penelitian telah mengkaji efek torefaksi terhadap kualitas *wood pellet*. Peningkatan nilai kalor *wood pellet* sebesar 20–30% telah ditemukan sebagai hasil dari torefaksi pada suhu tinggi, selain itu, sifat hidrofobiknya juga mengalami peningkatan yang signifikan [7]. Proses torefaksi yang dilakukan pada suhu 200°C, 250°C, dan 300°C terhadap *wood pellet* dari kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dalam reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) telah menghasilkan peningkatan nilai kalor hingga 20,8 MJ/kg, menurunkan kadar air dari 12,25% menjadi 3,54%, serta meningkatkan kandungan lignin hingga 47,38% [8].

Selain itu, peningkatan densitas energi sekitar 30% dibandingkan *wood pellet* mentah telah diamati pada *wood pellet* dari kayu pinus yang ditorefaksi pada suhu 260–270°C, dengan kandungan karbon tetap yang meningkat secara signifikan [9].

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa proses torefaksi dapat meningkatkan ketahanan *wood pellet* terhadap kelembaban dan memperbaiki karakteristik pembakarannya [10] [11] [12].

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, beberapa kesenjangan penelitian masih ditemukan terkait penerapan torefaksi pada *wood pellet*. Sebagian besar penelitian yang telah dilakukan masih berfokus pada satu jenis kayu tertentu, sementara efek torefaksi pada campuran kayu dengan karakteristik yang berbeda belum banyak dikaji secara mendalam.

Selain itu, parameter operasional torefaksi, seperti temperatur, masih perlu dieksplorasi lebih lanjut untuk mengoptimalkan kualitas akhir *wood pellet*. Studi terkait dampak lingkungan dan ekonomi dari penerapan teknologi torefaksi dalam skala industri juga masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas proses torefaksi pada berbagai jenis biomassa serta implikasi jangka panjangnya terhadap rantai pasok energi terbarukan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh temperatur torefaksi terhadap karakteristik *wood pellet*. Fokus utama penelitian adalah meningkatkan nilai kalor, sifat hidrofobik *wood pellet*, sehingga dapat menjadi alternatif yang lebih kompetitif sebagai substitusi bahan bakar fosil serta dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan sampel biomassa komersial yang terbuat dari limbah furnitur dengan kayu campuran. *Wood pellet* yang digunakan terdiri dari 80% kayu keras dan 20% kayu lunak. Jenis kayu keras yang digunakan meliputi Meranti, Merbau, Ulin, Mahoni, dan Keruing, sedangkan kayu lunak terdiri dari Sengon dan Pinus dengan diameter 8,3 mm dan panjang 18,4. Material sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Material *wood pellet*

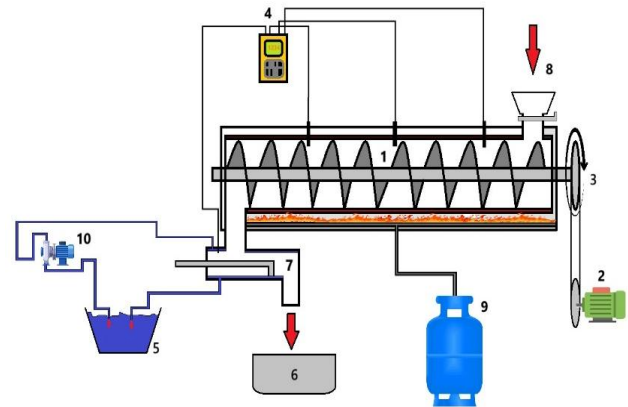
Proses torefaksi dilakukan menggunakan reaktor tubular kontinu dengan sistem pemanas oil jacket. *Eksperiment set up* reaktor torefaksi dapat dilihat pada Gambar 2. Reaktor memiliki kapasitas pemrosesan 5 kg/jam dan mampu mencapai suhu maksimum 375°C [13].

Komponen utama reaktor terdiri atas tabung reaktor (1), *hooper* pengumpan biomassa (8), sistem penggerak (*electromotor* dan *gear reducer*) (2,3), *burner* LPG sebagai sumber panas (9), sistem pencatat suhu (*data logger* dengan sensor termokopel tipe-K) (4), sistem pendingin (*cooling char*) (5,7,10), serta wadah penampung hasil torefaksi (6). Pengendalian suhu dilakukan secara berkala selama proses menggunakan empat sensor termokopel yang dipasang di berbagai titik pada reaktor.

Proses torefaksi dilakukan pada suhu 250°C, 275°C, dan 300°C dengan waktu tinggal selama 30 menit. Setiap sampel *wood pellet* dimasukkan ke dalam hopper dan ditransportasikan secara kontinu ke dalam reaktor. Setelah proses selesai, produk torefaksi dikeluarkan, didinginkan secara alami, dan disimpan dalam kantong plastik tertutup rapat sebelum pengujian lanjutan dilakukan.

Pengujian nilai kalor dilakukan menggunakan *Oxygen Bomb Calorimeter BK-1A+* sesuai dengan standar ASTM D5865 dan dikalibrasi menggunakan *benzoic acid* berdasarkan ISO/TR 12148. Sebelum pengujian, area sekitar unit dipastikan bersih dan bebas dari rembesan air. Analisis proximat produk hasil torefaksi menggunakan metode uji SNI 1683 : 2021

butir 7.3 (*Volatile Matter*), SNI 1683 : 2021 butir 7.2 (*Ash Content*), dan SNI 1683 : 2021 butir 7.1 (*Moisture Content*). Sementara analisis ultimate menggunakan metode uji, ASTM D4239-18el (*Sulfur*), ASTM D5373-21 (*Carbon, Hydrogen, Nitrogen*) dan ASTM D3176-24 (*Oxygen*).



Gambar 2. Reaktor Torefaksi

Pengujian hidrofobik dilakukan dengan merendam *wood pellet* ke dalam air selama 24 jam. Observasi visual dilakukan pada interval waktu 1 menit, 5 menit, 30 menit, 1 jam, 10 jam, dan 24 jam untuk menilai perubahan warna air dan kestabilan bentuk *wood pellet* selama perendaman.

Mass yield dihitung dengan membandingkan massa produk hasil torefaksi dengan massa biomassa awal, sedangkan *energy yield* dihitung berdasarkan hasil perkalian *mass yield* dengan rasio nilai kalor hasil torefaksi terhadap nilai kalor biomassa awal. Adapun rumus perhitungan tersebut mengacu pada [14].

$$\text{Mass Yield (\%)} = \left(\frac{\text{Massa setelah torefaksi}}{\text{Massa sebelum torefaksi}} \right) \times 100 \quad (1)$$

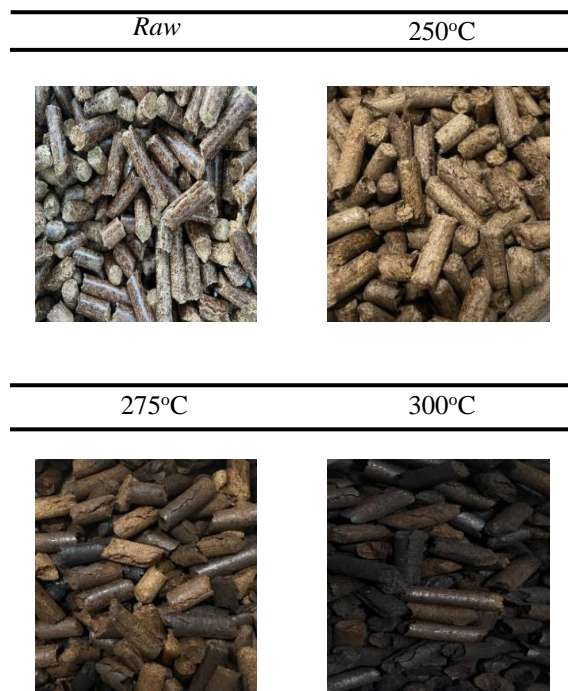
$$\text{Energy Yield (\%)} = \text{Mass Yield} \times \left(\frac{\text{HHV setelah torefaksi}}{\text{HHV sebelum torefaksi}} \right) \times 100 \quad (2)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perubahan Visual Produk Torefaksi

Warna *wood pellet* yang semula berwarna coklat muda pada kondisi mentah (*raw*) mengalami perubahan menjadi coklat tua pada suhu 250°C dan 275°C. Pada suhu

300°C warna *wood pellet* berubah menjadi hitam pekat. Perubahan warna ini disebabkan oleh terjadinya reaksi dekomposisi termal komponen hemiselulosa dan sebagian selulosa, serta meningkatnya degradasi lignin pada suhu tinggi. Semakin tinggi suhu torrefaksi, semakin intens proses karbonisasi yang terjadi, sehingga warna produk menjadi lebih gelap [15] [16] [17]. Pada Gambar 3 perubahan visual pada produk *wood pellet* hasil proses torrefaksi ditunjukkan dengan jelas.



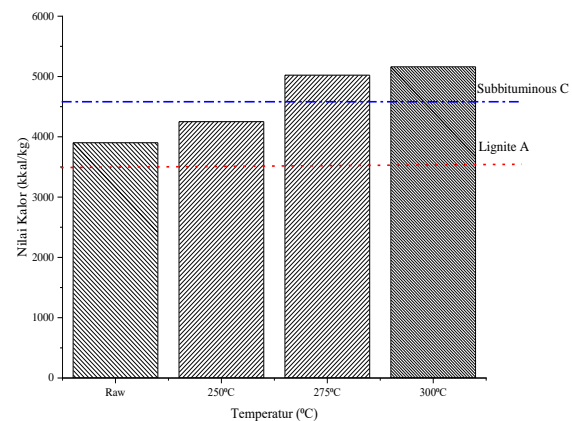
Gambar 3. Visual Produk Torefaksi

3.2. Nilai Kalor

Hasil pengujian nilai kalor menunjukkan adanya peningkatan signifikan seiring dengan kenaikan suhu torrefaksi. Nilai kalor *wood pellet* tanpa torrefaksi (*raw*) tercatat sebesar 3.902 kkal/kg. Pada suhu 250°C, nilai kalor meningkat menjadi sekitar 4.251 kkal/kg, dan terus meningkat pada suhu 275°C mencapai 5.022 kkal/kg.

Nilai kalor tertinggi dicapai pada suhu 300°C yaitu ± 5.161 kkal/kg, yang mendekati nilai kalor batubara jenis Sub-bituminous C. Peningkatan nilai kalor ini disebabkan oleh penurunan kadar *moisture*, *volatile matter*, serta peningkatan

kandungan karbon tetap akibat proses devolatilisasi selama torrefaksi [18] [19].



Gambar 4. Grafik Nilai Kalor

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian [9] yang menunjukkan bahwa kenaikan temperatur torrefaksi dan lamanya waktu tinggal berpengaruh signifikan terhadap kenaikan nilai kalor dan peningkatan kandungan karbon, disertai penurunan kadar oksigen serta *volatile matter*. Selain itu, studi [6] juga mendukung temuan tersebut, di mana peningkatan temperatur torrefaksi menghasilkan peningkatan nilai kalor pada biopellet, sehingga lebih efisien dalam penyimpanan dan pembakaran.

3.3. Analisis Proksimat

Berdasarkan analisis proksimat, pengaruh torrefaksi terhadap komposisi kadar air, zat volatil, abu, dan karbon tetap sangat nyata. Kandungan air (*moisture content*) pada produk torrefaksi dengan temperatur 275°C sebesar 3,78%, sedangkan pada temperatur 300°C meningkat menjadi 4,25%. Meskipun terjadi peningkatan, kadar air tersebut tetap berada dalam kisaran yang rendah jika dibandingkan dengan biomassa mentah yang sebelumnya 8,2%. Kandungan air yang rendah ini mengindikasikan bahwa produk hasil torrefaksi memiliki stabilitas yang lebih baik selama penyimpanan dan transportasi, serta peningkatan nilai kalor. Seperti yang dijelaskan oleh [14] kadar air yang lebih rendah akan mengurangi kehilangan energi selama pembakaran dan meningkatkan efisiensi konversi energi biomassa.

Kandungan karbon terikat (*fixed carbon*) pada temperatur 275°C tercatat sebesar 18,12% dan meningkat secara signifikan menjadi 27,55% pada temperatur 300°C. Peningkatan ini disebabkan oleh proses devolatilisasi yang lebih intensif pada temperatur tinggi, di mana komponen *volatile matter* terurai, menyisakan karbon sebagai komponen dominan.

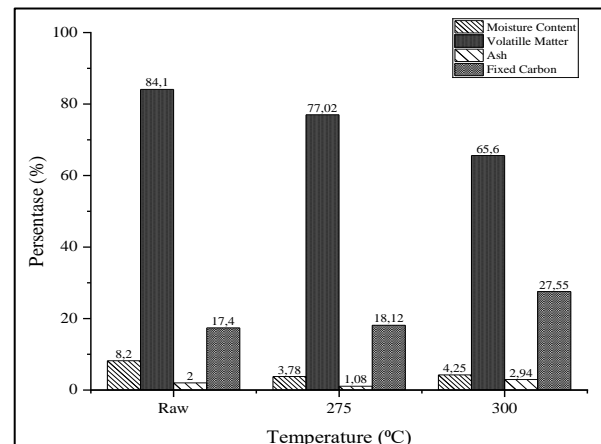
Fixed carbon yang lebih tinggi akan meningkatkan kualitas bahan bakar biomassa, karena kandungan ini berperan langsung dalam pembakaran yang lebih efisien dan nilai kalor yang lebih tinggi. Degradasi termal zat volatil yang signifikan, menghasilkan produk kaya karbon dengan karakteristik bahan bakar yang lebih baik [20] [21].

Sebagaimana juga dijelaskan oleh [9], peningkatan *fixed carbon* mencerminkan peningkatan karakteristik termal biomassa setelah torefaksi. Kandungan *volatile matter* mengalami penurunan dari 77,02% pada 275°C menjadi 65,6% pada 300°C. Penurunan ini mencerminkan hilangnya senyawa organik yang mudah menguap akibat proses dekomposisi termal. Meskipun *volatile matter* berkontribusi terhadap pembakaran cepat, penurunannya menunjukkan bahwa biomassa telah mengalami peningkatan stabilitas termal.

Kandungan abu (*ash*) juga mengalami peningkatan dari 1,08% menjadi 2,94%, yang menunjukkan terkonsentrasinya material anorganik setelah komponen organik terurai. Peningkatan ini masih tergolong rendah dan dapat diterima, karena abu yang terlalu tinggi dapat menghambat proses pembakaran dan menurunkan efisiensi energi.

Sementara itu, kandungan sulfur tetap rendah, dengan nilai 0,007% pada 275°C dan sedikit meningkat menjadi 0,01% pada 300°C, menunjukkan bahwa produk hasil torefaksi masih sesuai untuk digunakan sebagai bahan bakar ramah lingkungan. Literatur terkait mendukung temuan ini, menggambarkan penurunan zat

volatil dan kadar air yang tipikal serta peningkatan karbon tetap akibat proses torefaksi [22] [23].



Gambar 5. Grafik Analisis Proksimat

3.4. Analisis Ultimat

Dalam analisis ultimat, komposisi unsur *wood pellet* yang ditorefaksi menunjukkan perubahan signifikan. Kandungan nitrogen (N) pada produk hasil torefaksi kayu campuran mengalami peningkatan seiring dengan naiknya temperatur. Pada temperatur 275°C, kandungan nitrogen tercatat sebesar 0,22%, sedangkan pada temperatur 300°C meningkat menjadi 0,64%.

Peningkatan kandungan nitrogen ini dapat disebabkan oleh dekomposisi senyawa protein yang tidak sepenuhnya terurai pada temperatur lebih tinggi. Meskipun demikian, kandungan nitrogen yang relatif rendah tetap menguntungkan, karena bahan bakar dengan kandungan nitrogen yang lebih kecil akan menghasilkan emisi NO_x yang lebih rendah saat pembakaran, sehingga lebih ramah lingkungan.

Kandungan karbon (C) pada produk hasil torefaksi mengalami peningkatan signifikan dari 49,86% pada 275°C menjadi 60,19% pada 300°C. Peningkatan karbon ini menunjukkan bahwa proses torefaksi telah berhasil mengurangi kadar volatil dan meningkatkan konsentrasi karbon dalam bahan bakar. Kandungan karbon yang tinggi menunjukkan potensi nilai kalor yang lebih besar, menjadikan *wood pellet* hasil

torefaksi lebih efisien sebagai sumber energi. Hal ini sesuai dengan prinsip bahwa proses pirolisis parsial pada temperatur lebih tinggi mengurangi kadar hidrogen dan oksigen, sehingga rasio karbon dalam material meningkat.

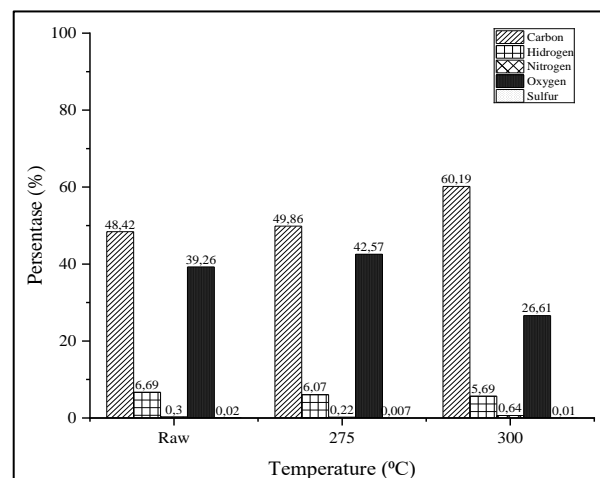
Kandungan hidrogen (H) mengalami sedikit penurunan dari 6,07% pada 275°C menjadi 5,69% pada 300°C. Penurunan ini terjadi karena proses devolatilisasi yang menghilangkan hidrokarbon ringan selama pemanasan. Selain itu, kandungan oksigen (O) mengalami penurunan signifikan dari 42,57% menjadi 26,61%. Hal ini mencerminkan bahwa proses torefaksi telah berhasil meningkatkan sifat hidrofobik bahan bakar, karena kandungan oksigen yang lebih rendah mengindikasikan lebih sedikit gugus hidroksil dan karbonil dalam struktur biomassa. Penurunan ini mencerminkan dekomposisi termal yang terjadi selama torefaksi, di mana senyawa volatil dilepaskan, sehingga meningkatkan densitas energi pellet [15] [17].

Pengurangan kandungan oksigen ini juga berarti peningkatan efisiensi pembakaran, karena bahan bakar dengan rasio O/C yang lebih rendah akan menghasilkan lebih banyak energi per satuan massa. Persentase fraksi karbon (C) mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya temperatur torefaksi, sedangkan fraksi hidrogen (H) justru mengalami penurunan. Menurut [24], fenomena ini terjadi akibat adanya proses oksidasi dan pelepasan karbon dioksida, yang menyebabkan pemutusan rantai polimer serta penghilangan gugus hidroksil (OH) dan gugus fungsional lainnya selama proses torefaksi pada *wood pellet*.

Selain itu, kandungan nitrogen dan sulfur tidak mengalami perubahan signifikan selama proses, menunjukkan bahwa torefaksi lebih dominan mempengaruhi komponen organik utama dalam biomassa [16] [18].

Perubahan konsentrasi atom yang terjadi baik peningkatan maupun penurunan yang mempengaruhi nilai kalor dan kualitas bahan bakar. Pada temperatur 275 °C, rasio

O/C berada pada 0,640 dengan H/C sebesar 1,461, sedangkan pada temperatur 300 °C, rasio O/C mengalami penurunan menjadi 0,332 dan H/C menjadi 1,134. Penurunan rasio atom ini mengindikasikan adanya proses dekomposisi senyawa oksigen dan hidrogen dalam biomassa selama proses torefaksi. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan temperatur akan menyebabkan hilangnya senyawa volatil yang mengandung oksigen dan hidrogen, sehingga meningkatkan karakteristik bahan bakar padat yang dihasilkan [6].

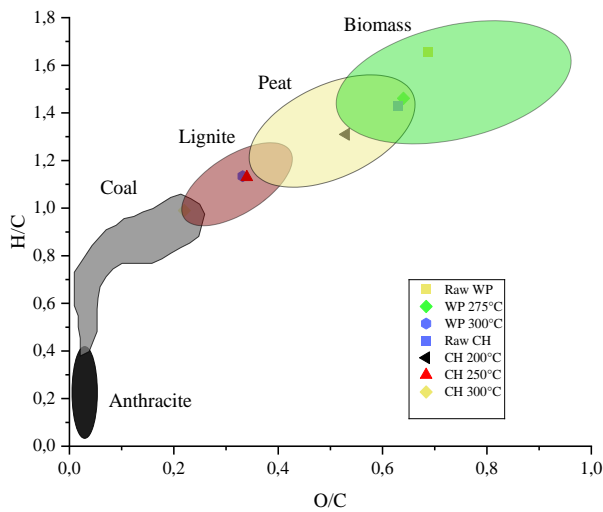


Gambar 6. Grafik Analisis Ultimat

Diagram Van Krevelen digunakan untuk menganalisis karakteristik bahan bakar biomassa berdasarkan rasio hidrogen terhadap karbon (H/C) dan oksigen terhadap karbon (O/C). Jika di plot dalam diagram Van Krevelen (Gambar 7) hubungan rasio atom H/C dan O/C, terlihat bahwa *wood pellet* yang ditorefaksi pada 300 °C lebih mendekati karakteristik batubara dibandingkan dengan sampel pada temperatur 275 °C. Semakin rendah rasio O/C dan H/C menunjukkan bahwa biomassa mengalami peningkatan kualitas sebagai bahan bakar, karena memiliki lebih sedikit kandungan oksigen yang tidak memberikan kontribusi besar terhadap nilai kalor.

Sesuai dengan penelitian [13], rasio O/C yang lebih rendah akan meningkatkan nilai kalor bahan bakar. Sehingga produk torefaksi pada 300 °C dapat dikatakan memiliki kualitas yang lebih baik

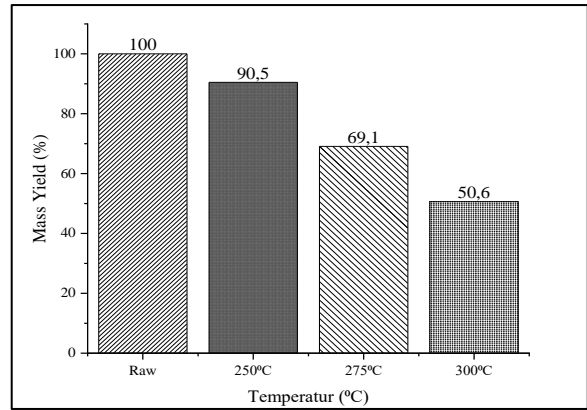
dibandingkan dengan pada temperatur yang lebih rendah. Pada Gambar 7 juga menunjukkan berbagai zona karakteristik bahan, termasuk WP (*Wood Pellet*) dan CH (*Coffee Husk*). WP umumnya memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dengan rasio O/C yang lebih rendah dibandingkan CH, akibat tingkat kerapatan energi yang lebih besar. CH, sebagai limbah dari industri kopi, cenderung memiliki kandungan oksigen yang lebih tinggi, yang dapat memengaruhi efisiensi pembakaran dan nilai kalor bahan tersebut.



Gambar 7. Plot Diagram Van Krevelen

3.5. Mass Yield dan Energi Yield

Mass yield mencerminkan jumlah massa yang hilang selama proses pemanasan, terutama dari pelepasan senyawa volatil seperti air dan karbondioksida. *Mass yield* pada *wood pellet* hasil torefaksi menunjukkan tren penurunan seiring dengan naiknya temperatur proses. Pada temperatur 250°C, *mass yield* bernilai sebesar 90,5% menunjukkan bahwa proses dekomposisi termal masih dalam tahap awal. Pada temperatur ini, pelepasan air bebas dan sebagian kecil senyawa volatil seperti hemiselulosa menjadi kontributor utama penurunan berat. Hal ini sejalan dengan penelitian dari [14] yang menyatakan bahwa hemiselulosa mulai terdegradasi pada rentang temperatur 200–260°C, menyebabkan penurunan massa biomassa.



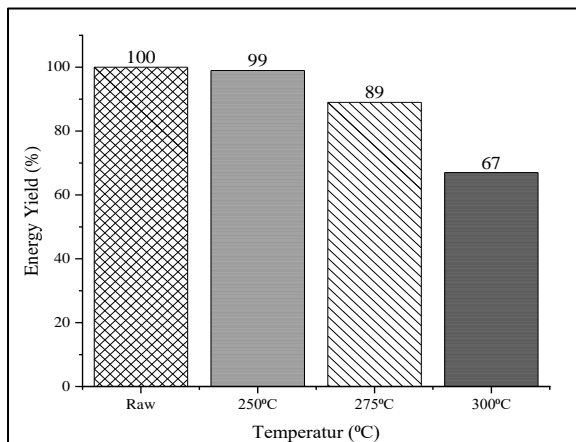
Gambar 8. Grafik *Mass Yield*

Ketika temperatur meningkat ke 275°C *mass yield* sebesar 69,1% dan 300°C *mass yield* sebesar 50,6%, *mass yield* menurun secara signifikan, mencerminkan proses dekomposisi yang lebih intensif. Pada 275°C, terjadi degradasi hemiselulosa yang lebih lanjut, diikuti dengan pemecahan sebagian selulosa. Pada 300°C, penurunan berat yang lebih tinggi terjadi akibat dekomposisi selulosa dan lignin yang semakin dominan, mengingat lignin stabil hingga temperatur 280–500°C. Penurunan *mass yield* juga mencerminkan peningkatan kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) dalam produk akhir, yang berkontribusi pada nilai kalor yang lebih tinggi dan kualitas *wood pellet* yang lebih baik sebagai bahan bakar padat.

Energy yield diperoleh dengan membandingkan sampel *wood pellet* sebelum dan sesudah mengalami proses torefaksi pada berbagai variasi temperatur, seperti yang ditampilkan pada Gambar 8. *energy yield* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur torefaksi. *Energy yield* mencerminkan fraksi energi yang tetap tersimpan dalam biomassa setelah proses pemanasan.

Pada temperatur 250°C, nilai *energy yield* masih relatif tinggi, yaitu 91,14%, namun menurun menjadi 66,29% saat temperatur meningkat ke 275°C, dan semakin rendah pada 300°C dengan nilai 56,3%. Penurunan ini terjadi karena semakin banyak senyawa volatil yang terlepas selama pemanasan, mengurangi total energi yang tersimpan dalam bahan

bakar akhir. Hasil ini sebanding antara tingkat keparahan torefaksi dengan karakteristik hasil biomassa [20] [25].



Gambar 8. Grafik Energy Yield

3.6. Sifat Hidrofobik

Hasil pengujian ketahanan *wood pellet* terhadap perendaman air menunjukkan bahwa proses torefaksi berpengaruh signifikan terhadap sifat hidrofobik *wood pellet*. Pada *wood pellet raw*, terjadi pelunakan dan dispersi partikel setelah perendaman lebih dari 10 jam, ditandai dengan perubahan warna air menjadi keruh. akibat kandungan hemiselulosa dan senyawa hidrofilik lainnya yang masih tinggi, sehingga mudah larut dalam air [26].

Temperatur	Waktu Perendaman					
	1 menit	5 menit	30 menit	1 jam	10 jam	24 jam
Raw						
250°C						
275°C						
300°C						

Gambar. 9 Uji Hidrofobik Wood Pellet

Pada perlakuan temperatur 250 °C, sifat hidrofobik *wood pellet* mulai menunjukkan perbaikan, terutama pada waktu perendaman singkat hingga menengah. *Wood pellet* masih mempertahankan bentuk fisiknya dengan lebih baik dibandingkan sampel *raw*,

meskipun pada perendaman jangka panjang masih terlihat perubahan warna air yang cukup intens dan indikasi penetrasi air ke dalam struktur *wood pellet*. Hal ini mengindikasikan bahwa pada temperatur tersebut degradasi hemiselulosa telah terjadi, namun transformasi struktur kimia menuju fase yang lebih hidrofobik belum berlangsung secara optimal.

Peningkatan yang lebih nyata terlihat pada *wood pellet* yang diproses pada temperatur 275 °C. Pada kondisi ini, *wood pellet* menunjukkan stabilitas yang lebih baik selama seluruh rentang waktu perendaman, dengan laju perubahan visual yang relatif lambat dan degradasi mekanik yang minimal. Fenomena ini berkaitan dengan dekomposisi hemiselulosa yang lebih menyeluruh serta awal pembentukan struktur karbon aromatik, yang secara efektif menurunkan afinitas material terhadap air. Temperatur ini dapat dipandang sebagai kondisi transisi optimum, dimana peningkatan hidrofobisitas dicapai tanpa menyebabkan kerusakan struktur *wood pellet* yang berlebihan.

Wood pellet yang diproses pada temperatur 300 °C menunjukkan sifat hidrofobik paling unggul. *Wood pellet* mampu mempertahankan integritas bentuknya hingga perendaman 24 jam, sementara air perendaman relatif lebih stabil meskipun mengalami perubahan warna akibat senyawa organik non-polar hasil torefaksi. Pada temperatur ini, penurunan gugus hidroksil berlangsung sangat signifikan, disertai dengan peningkatan fraksi karbon aromatik dan kepadatan struktur internal, sehingga penetrasi air melalui mekanisme kapiler menjadi sangat terbatas. Kondisi ini menegaskan bahwa perlakuan termal pada temperatur tinggi secara efektif mengubah karakter biomassa dari hidrofilik menjadi hidrofobik [27] [28].

Dengan demikian, proses torefaksi efektif mengubah biomassa dari sifat hidrofilik menjadi lebih hidrofobik, meningkatkan ketahanan biomassa terhadap kelembaban, serta menjadikannya lebih

stabil selama penyimpanan dan transportasi [29] [30].

4. Kesimpulan

Perlakuan torefaksi yang diterapkan pada *wood pellet* limbah furnitur kayu campuran telah terbukti mampu meningkatkan karakteristik bahan bakar *wood pellet*. Peningkatan temperatur torefaksi dari 250°C hingga 300°C menghasilkan peningkatan signifikan pada nilai kalor, kandungan karbon tetap, dan sifat hidrofobik, serta menurunkan kadar air dan *volatile matter*. Nilai kalor tertinggi sebesar 5.161 kkal/kg diperoleh pada temperatur 300°C. *Mass yield* mengalami penurunan seiring peningkatan temperatur, namun *energy yield* tetap optimal pada temperatur 275°C. Selain itu, *wood pelet* hasil torefaksi menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap perendaman air, sehingga lebih stabil untuk penyimpanan. Temuan ini menunjukkan bahwa proses torefaksi efektif dalam meningkatkan kualitas *wood pellet* sebagai sumber energi terbarukan alternatif.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Kobelco Trading Indonesia dan PT. Sararasa Biomassa atas bantuan dan fasilitas penyediaan *wood pellet* sebagai sampel pengujian .

Referensi

- [1] Prayitno, H., Amrul, Lestari, R., & Kurniawansah, R. (2024). Potential Torrefaction of Tropical Forest Fruits Waste. *Journal of Physics: Conference Series*, 2739(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2739/1/012005>
- [2] Ivanovski, M., Urbancl, D., Petrovič, A., Stergar, J., Goričanec, D., & Simonič, M. (2022). Improving Lignocellulosic and Non-Lignocellulosic Biomass Characteristics through Torrefaction Process. *Applied Sciences* (Switzerland), 12(23). <https://doi.org/10.3390/app122312210>
- [3] Bajcar, M., Zagula, G., Saletnik, B., Tarapatsky, M., & Puchalski, C. (2018). Relationship between torrefaction parameters and physicochemical properties of torrefied products obtained from selected plant biomass. *Energies*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/en11112919>
- [4] Rudiana, E., Hakim, H. N., & SST, N. (2024). *BADAN PUSAT STATISTIK BPS-STATISTICS INDONESIA*. 12.
- [5] Yoshida, T., Nomura, T., Gensai, H., Watada, H., Sano, T., & Ohara, S. (2015). Upgraded Pellet Making by Torrefaction—Torrefaction of Japanese Wood Pellets. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 05(03), 82–88. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2015.53008>
- [6] Çetinkaya, B., Erkent, S., Ekinci, K., Civan, M., Bilgili, M. E., & Yurdakul, S. (2024). Effect of torrefaction on fuel properties of biopellets. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e23989>
- [7] 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. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 82). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- [8] Rubiyanti, T., Hidayat, W., Gumay Febryano, I., Bakri, S., Kehutanan, J., Pertanian, F., & Lampung Jl Sumantri Brojonegoro, U. (2019). Karakterisasi Pelet Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) Hasil Torefaksi dengan Menggunakan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Characterization of

- Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) Pellets Torrefied with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor. *Jurnal Sylva Lestari ISSN*, 7(3), 321–331.
- [9] Canabal, A. I., Proupín Castiñeiras, J., Rodríguez Añón, J. A., Eimil Fraga, C., & Rodríguez Soalleiro, R. (2023). Predicting the energy properties of torrefied debarked pine pellets from torrefaction temperature and residence time. *Renewable Energy*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119346>
- [10] Yoshida, T., Kuroda, K., Kamikawa, D., Kubojima, Y., Nomura, T., Watada, H., Sano, T., & Ohara, S. (2020). *Water Resistance of Torrefied Wood Pellets Prepared by Two Methods*. <https://doi.org/10.20944/preprints202009.0735.v1>
- [11] Fraga, L. G., Silva, J., Teixeira, J. C., Ferreira, M. E. C., Teixeira, S. F., Vilarinho, C., & Gonçalves, M. M. (2022). Study of Mass Loss and Elemental Analysis of Pine Wood Pellets in a Small-Scale Reactor. *Energies*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/en15145253>
- [12] Sutapa, J. P. G., & Hidayatullah, A. H. (2023). Torrefaction for Improving Quality of Pellets Derived from Calliandra Wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 51(5), 381–391. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2023.51.5.381>
- [13] Apriyanto, A., Hamzah, A., & Nafis, A. (2019). Rancang Bangun dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torrefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *MECHANICAL ; Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 9(2), 54–66. <https://doi.org/10.23960/mech.v9i2.987>
- [14] Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction Practical Design and Theory Third Edition*.
- [15] Jenicek, L., Neskudla, M., Malatak, J., Velebil, J., & Passian, L. (2021). Spruce and Barley Elemental and Stochiometric Analysis Affected by the Impact of Pellet Production and Torrefaction. *Acta Technologica Agriculturae*, 24(4), 166–172. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0028>
- [16] Rollinson, A. N., & Williams, O. (2016). Experiments on torrefied wood pellet: Study by gasification and characterization for waste biomass to energy applications. *Royal Society Open Science*, 3(5). <https://doi.org/10.1098/rsos.150578>
- [17] Oginni, O. T., Fadiji, E. A., Ajewole, A. R., & Olumilua, A. E. (2024). An Overview of the Biomass Torrefaction Technology and Characterization of Solid Waste Fuels. *UNIOSUN Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 6(2). <https://doi.org/10.36108/ujees/4202.60.0260>
- [18] Nhuchhen, D. R., & Afzal, M. T. (2017). HHV predicting correlations for torrefied biomass using proximate and ultimate analyses. *Bioengineering*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/bioengineering4010007>
- [19] Araújo, S. de O., Neiva, D. M., Carneiro, A. de C., Esteves, B., & Pereira, H. (2018). Potential of mild torrefaction for upgrading the wood energy value of different Eucalyptus species. *Forests*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/f9090535>
- [20] Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudolfsson, M., & Nielsen, H. K. (2020a). Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy and Fuels*, 34(12), 15343–15354.

- <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02671>
- [21] Segun, B. R., O., O. A., & E., O. T. (2022). Effect of Residence Time On Characteristics of Torrefied Sawdust Produced from Gmelina Arborea (Roxb) Wood. *Trends in Applied Sciences Research*, 17(4), 168–179. <https://doi.org/10.3923/tasr.2022.168.179>
- [22] Oh, S., Park, D. H., Lee, S. M., Ahn, B. J., Ahn, S. H., & Yang, I. (2019). Effect of Torrefaction Temperature on Lignin Distribution of *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. Cubes and the Impact of Binder on Durability of Pellets Fabricated with the Torrefied Cubes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(5). <https://doi.org/10.1002/ep.13190>
- [23] Han, S. H., Meng, L., Rahman, A., Ko, Y., Cho, M. S., & Park, B. B. (2017). Torrefied wood effects on the seedling quality of *Zelkova serrata* and *Fraxinus rhynchophylla* in a containerized production system. *Forest Science and Technology*, 13(4), 145–151. <https://doi.org/10.1080/21580103.2017.1379446>
- [24] Amrul., Apriyanto, A., Prayitno, H., & Azmar, M. (2025). Effect of residence time on the torrefaction characteristics of Calliandra wood as solid biofuel. *Jurnal Polimesin Vol* 23(2), 293-300 <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i3.6656>.
- [25] Rantuch, P., Martinka, J., & Ház, A. (2021). The evaluation of torrefied wood using a cone calorimeter. *Polymers*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/polym13111748>
- [26] Humar, M., Vek, V., Oven, P., Lesar, B., Kržišnik, D., Keržič, E., Hočevar, M., & Brus, R. (2022). Durability and Moisture Dynamics of Douglas-Fir Wood From Slovenia. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.860734>
- [27] Lima, L. V. L., de Castro, V. R., Surdi, P. G., Zanuncio, A. J. V., Zanuncio, J. C., Carneiro, A. de C. O., Gominho, J., & Araújo, S. de O. (2023). Properties of Pinus sp. pellets prepared after in-line pre-compaction with torrefaction. *BioResources*, 18(2), 3440–3451. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.3440-3451>
- [28] Fuwape, J. A., & Opara, E. U. (2023). Emissions and combustion characteristics of torrefied wood pellets. *BioResources*, 19(1), 134–145. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.134-145>
- [29] Mukherjee, A., Okolie, J. A., Niu, C., & Dalai, A. K. (2022). Experimental and Modeling Studies of Torrefaction of Spent Coffee Grounds and Coffee Husk: Effects on Surface Chemistry and Carbon Dioxide Capture Performance. *ACS Omega*, 7(1), 638–653. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05270>.
- [30] A. Apriyanto And M. Tohirin, “Experimental Study Of Conversion Of Waste Biomass Into Renewable Fuel Using The Torrefaction Process,” 2022