

# jTEP

## JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 10, No. 1, April 2022



Publikasi Resmi  
**Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia**  
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)  
bekerjasama dengan  
**Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA**  
Institut Pertanian Bogor



## DAFTAR ISI

### *Technical Paper*

1

**Limbah Padat Kelapa Sawit sebagai Alternatif Energi Pembangkit Listrik di Barat Selatan Aceh**  
*Palm Oil Solid Waste as an Alternative Energy Source of Electricity generation in The Southwest of Aceh*  
Agustiar, Tajuddin Bantacut, Bambang Pramudya

11

**Pengaruh Proses Torefaksi terhadap Kualitas Serbuk Kayu**  
*The Torrefaction Effect on The Sawdust Quality*  
Ismail, Erlanda Augupta Pane, I Gede Eka Lesmana, Rovida Camalia Hartantrie, Deni Rifki.

21

**Penerapan Metode Ekstraksi Microwave Untuk Meningkatkan Rendemen dan Mutu Oleoresin Lada Putih (*Piper nigrum L*)**  
*Application of Microwave-Assisted Extraction Method to Improve Yield and Quality of White Pepper (*Piper nigrum L*) Oleoresin.*  
Annisa Purnamasari Damanik, Edy Hartulistiyoso\*, Rokhani Hasbullah.

29

**Pengaruh Waktu Pemanasan, Jenis dan Konsentrasi Plasticizer Terhadap Karakteristik Edible Film K-karagenan**  
*The Effect of Heating Time, Type and Plasticizer Concentration on Characteristics of Edible Film K-carrageenan*  
Desi Juliani\*, Nugraha Edhi Suyatma, Fahim Muchammad Taqi.

41

**Pemanfaatan Water Power Generator di Saluran Irigasi Tersier untuk Penanganan Hama Padi**  
*Utilization of Water Power Generator in The Tertiary Irrigation Canal for Paddy's Pest Handling*  
Lilis Dwi Saputri, Elsa Wulandari, Febri Nur Azra, Afik Hardanto\*.

49

**Sistem Monitoring dan Kontrol Iklim Mikro pada Plant Factory Berbasis Internet of Things**  
*Microclimate Monitoring and Control System in a Plant Factory Using the Internet of Things*  
Ardiansyah\*, Ikhsan Nur Rahmaan, Eni Sumarni, Afik Hardanto.

59

**Portable/Handheld NIR sebagai Teknologi Evaluasi Mutu Bahan Pertanian secara Non-Destruktif**  
*Portable/Handheld NIR as a Non-Destructive Technology for Quality Evaluation of Agricultural Materials*  
Widyaningrum\*, Y Aris Purwanto, Slamet Widodo, Supijatno, Evi Savitri Iriani.

69

**Detection of Chilling Injury Symptoms of Salak Pondoh Fruit during Cold Storage with Near Infrared Spectroscopy (NIRS)**  
Sutrisno Suro Mardjan\* and Jerry Indriantoro.

77

**Studi Penentuan Daya Tampung Beban Pencemaran Sungai Bedadung Kabupaten Jember Menggunakan Program Qual2Kw**  
*Determination of Total Pollution Load Capacity at the Bedadung River, Jember Regency Using Qual2Kw Program*  
Elida Novita, Rodzika Diah Mauvi, Hendra Andianata Pradana\*.

85

**Analisis Orifice pada Reaktor Biodiesel Sistem Kavitasi Hidrodinamik dengan Computational Fluid Dynamics**  
*Orifice Analysis in Biodiesel Reactor with Hydrodynamic Cavitation System using Computational Fluid Dynamics*  
Yayan Heryana\*, Dyah Wulandani, Supriyanto.

---

#### Penerbit:

Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor d/a Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026, E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com. Website: <http://web.ipb.ac.id/~jtep>.



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember, Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain meliputi teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam **invited paper** yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, **review** perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, **technical paper** hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta **research methodology** berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

**Penanggungjawab:**

Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB  
Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia

**Dewan Redaksi:**

Ketua : Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, IPB University)  
Anggota : Abdul Hamid Adom (Scopus ID: 6506600412, University Malaysia Perlis)  
(*editorial board*) Addy Wahyudie (Scopus ID: 35306119500, United Arab Emirates University)  
Budi Indra Setiawan (Scopus ID: 55574122266, IPB University)  
Balasuriya M.S. Jinendra (Scopus ID: 30467710700, University of Ruhuna)  
Bambang Purwantana (Scopus ID: 6506901423, Universitas Gadjah Mada)  
Bambang Susilo (Scopus ID: 54418036400, Universitas Brawijaya)  
Daniel Saputera (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya)  
Han Shuqing (Scopus ID: 55039915600, China Agricultural University)  
Hiroshi Shimizu (Scopus ID: 7404366016, Kyoto University)  
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana)  
Agus Arif Munawar (Scopus ID: 56515099300, Universitas Syahkuala)  
Armansyah H. Tambunan (Scopus ID: 57196349366, IPB University)  
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, IPB University)  
M. Rahman (Scopus ID: 7404134933, Bangladesh Agricultural University)  
Machmud Achmad (Scopus ID: 57191342583, Universitas Hasanuddin)  
Muhammad Makky (Scopus ID: 55630259900, Universitas Andalas)  
Muhammad Yulianto (Scopus ID: 54407688300, IPB University & Waseda University)  
Nanik Purwanti (Scopus ID: 23101232200, IPB University & Teagasc Food Research Center Irelandia)  
Pastor P. Garcia (Scopus ID: 57188872339, Visayas State University)  
Rosnah Shamsudin (Scopus ID: 6507783529, Universitas Putra Malaysia)  
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin)  
Sate Sampattagul (Scopus ID: 7801640861, Chiang Mai University)  
Subramaniam Sathivel (Scopus ID: 6602242315, Louisiana State University)  
Shinichiro Kuroki (Scopus ID: 57052393500, Kobe University)  
Siswoyo Soekarno (Scopus ID: 57200222075, Universitas Jember)  
Tetsuya Araki (Scopus ID: 55628028600, The University of Tokyo)  
Tusan Park (Scopus ID: 57202780408, Kyungpook National University)

---

**Redaksi Pelaksana:**

Ketua : Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, IPB University)  
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, IPB University)  
Bendahara : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, IPB University)  
Anggota : Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, IPB University)  
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, IPB University)  
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, IPB University)  
Leopold Oscar Nelwan (Scopus ID: 56088768900, IPB University)  
I Wayan Astika (Scopus ID: 43461110500, IPB University)  
I Dewa Made Subrata (Scopus ID: 55977057500, IPB University)  
Administrasi : Khania Tria Tifani (IPB University)

**Penerbit:** Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor bekerjasama dengan Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA).

**Alamat:** Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem,  
Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680.  
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,  
E-mail: [jtep@apps.ipb.ac.id](mailto:jtep@apps.ipb.ac.id)  
Website: <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

**Rekening:** BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

**Percetakan:** PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

---

## Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah naskah pada penerbitan Vol. 10, No. 1 April 2022. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Dr.Eng. Obie Farobie, S.Si, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Lilis Sucahyo, S.TP, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Dr.Agr.Sc., Diding Suhandy, S.TP., M.Agr (Universitas Negeri Lampung), Yusuf Hendrawan, STP, M.App.Life Sc., PhD (Universitas Brawijaya), Dr.Ir. I Ketut Budaraga, M.Si (Universitas Ekasakti), Ir. Sri Endah Agustina, MS (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Asri Widyasanti, S.TP., M.Eng (Universitas Padjadjaran), Dr.Ir. Christina Winarti, MA (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pasca Panen Pertanian), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata, M. Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Dr. Supriyanto, S.TP, M.Kom (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Bayu Dwi Apri Nugroho, S.T.P., M.Agr., Ph.D (Universitas Gadjah Mada), Ansita Gupitakingkin Pradipta, ST, M.Eng (Universitas Gadjah Mada), Dr. Andasuryani, S.TP, M.Si (Universitas Andalas), Dr.Ir. Lady Lengkey, M.Si (Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. I Wayan Budiastara, M. Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Prof.Dr.Ir. Usman Ahmad, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University).

---



*Technical Paper*

## **Pengaruh Proses Torefaksi terhadap Kualitas Serbuk Kayu**

### *The Torrefaction Effect on The Sawdust Quality*

**Ismail**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila,  
Srengseng Sawah-Jagakarsa, DKI Jakarta 12640, Indonesia

**Erlanda Augupta Pane\***, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila,  
Srengseng Sawah-Jagakarsa, DKI Jakarta 12640, Indonesia  
Email : [erlanda.pane@univpancasila.ac.id](mailto:erlanda.pane@univpancasila.ac.id)

**I Gede Eka Lesmana**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila,  
Srengseng Sawah-Jagakarsa, DKI Jakarta 12640, Indonesia

**Rovida Camalia Hartantrie**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila,  
Srengseng Sawah-Jagakarsa, DKI Jakarta 12640, Indonesia

**Deni Rifki**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila,  
Srengseng Sawah-Jagakarsa, DKI Jakarta 12640, Indonesia

#### **Abstract**

*Sawdust has potential as a new renewable energy source which it still has some negative characteristics including the high oxygen amount, low heat energy, and high moisture content. Torrefaction is a method that can reduce the negative characteristics of sawdust. Therefore, this research has aimed to analyze the torrefaction effect on sawdust characteristics. The research method uses the experimental analysis with a batch-type reactor influenced by temperature (i.e. 260°C, 280°C, and 300°C), residence time (30 minutes), and torrefaction gas. The results explain the torrefaction temperature of 300°C is the optimal result. The conditions can increase the heat energy of sawdust until 5350 kcal/kg had classified into sub-bituminous coal. It also reduces solid yield and energy yield of sawdust by 63% and 84%, respectively. The fixed carbon of sawdust increased by that condition of 33.35%. The volatile matter, oxygen content, and hydrogen content of sawdust also reduce to 60.97%, 34.37%, and 5.72%, respectively. The sawdust from the torrefaction treatment can be an alternative biofuel.*

**Keywords:** Heat Energy, Inert Gas, Proximate, Sawdust, Torrefaction, Ultimate

#### **Abstrak**

Serbuk gergaji memiliki potensi sebagai sumber energi baru terbarukan yang masih memiliki beberapa karakteristik negatif antara lain jumlah oksigen yang tinggi, energi panas yang rendah, dan kadar air yang tinggi. Torefaksi merupakan salah satu metode yang dapat mengurangi sifat negatif serbuk gergaji. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh torefaksi terhadap karakteristik serbuk gergaji. Metode penelitian menggunakan analisis eksperimental dengan reaktor tipe *batch* yang dipengaruhi oleh suhu (260°C, 280°C, dan 300°C), waktu tinggal (30 menit), dan gas torefaksi. Hasil penelitian menjelaskan suhu torefaksi 300°C merupakan hasil yang optimal. Kondisi tersebut dapat meningkatkan energi panas serbuk gergaji hingga 5350 kkal/kg yang tergolong ke dalam kelas batubara sub-bituminus. Kondisi ini juga mengurangi hasil padat dan hasil energi serbuk gergaji masing-masing sebesar 63% dan 84%. *Fixed carbon* serbuk gergaji meningkat pada kondisi tersebut sebesar 33.35%. Kandungan *volatile matter*, oksigen, dan hidrogen pada serbuk gergaji juga turun masing-masing menjadi 60.97%, 34.37%, dan 5.72%. Serbuk gergaji hasil pengolahan torefaksi dapat menjadi bahan bakar alternatif.

**Kata Kunci:** Inert gas, Nilai Kalor, Proximate, Serbuk Kayu, Torefaksi, Ultimate

*Diterima: 16 Agustus 2021; Disetujui: 21 Januari 2022.*

## Latar Belakang

Kayu merupakan biomassa yang terkenal di masyarakat dan tergolong sebagai sumber energi baru terbarukan terutama pada serbuk kayunya sebagai produk limbah hasil industri kerajinan kayu (Yasin *et al.* 2020). Data statistik menjelaskan produksi kerajinan kayu meningkat pada rentangan tahun 2013-2015 dengan jumlah produk sebesar 1670.8 m<sup>3</sup> pada tahun 2013; 14894.7 m<sup>3</sup> pada tahun 2014; dan 18690.48 m<sup>3</sup> pada tahun 2015. Hasil produk kerajinan kayu tersebut dapat menghasilkan serbuk kayu dengan persentase rata-rata sebesar 50.2% dari total produk kayu per tahun (Kementerian Kehutanan 2015). Serbuk kayu merupakan bahan yang berpotensi menjadi sumber energi baru terbarukan, salah satunya sebagai bahan bakar alternatif pada boiler pembangkit listrik. Namun, serbuk kayu masih memiliki beberapa kelemahan antara lain kandungan oksigen yang tinggi, nilai kalor rendah, bersifat higroskopis, kadar air tinggi, dan nilai densitas rendah sehingga kinerjanya tidak efektif. Kandungan oksigen tinggi menyebabkan asap tebal selama proses pembakaran (Ahmed *et al.* 2020). Kadar air tinggi dapat mempengaruhi kebutuhan massa serbuk kayu yang tinggi saat proses pembakaran. Densitas yang rendah menyebabkan permasalahan pada distribusi bahan dan tempat penyimpanan briket (Tumuluru *et al.* 2011). Sifat higroskopik membuat serbuk kayu mudah untuk menyerap air sehingga menyebabkan kesulitan dalam proses penggilingan untuk dijadikan sebagai bahan bakar pada boiler (Wannapeera, Fungtammasan, and Worasuwannarak 2011). Beberapa tempat pengolahan serbuk kayu juga masih terbatas di Indonesia, khususnya di daerah Banten. Kondisi ini diperkuat dengan banyaknya pengolahan serbuk kayu hanya sebatas pada proses pembuangan dan pembakaran, sehingga menciptakan pencemaran lingkungan dan membahayakan kehidupan ekologi makhluk hidup. Salah satu proses yang mampu mengatasi permasalahan pengolahan serbuk kayu tersebut adalah proses torefaksi. Torefaksi merupakan proses termokimia dalam kondisi ketersediaan oksigen terbatas atau *inert* pada suhu 200°C sampai dengan 300°C yang dipertahankan selama waktu tertentu (Abbasi *et al.* 2019). Proses penguapan senyawa oksigen biomassa dari degradasi hemiselulosa terjadi sangat cepat selama proses torefaksi jika dibandingkan dengan proses pengeringan biasa (Basu 2018). Kondisi ini membuat senyawa oksigen yang menguap membentuk gas torefaksi yang dapat dikondensasi maupun tidak dapat dikondensasi (Nunes, Matias, and Catalão 2018). Selain itu, proses torefaksi juga menghasilkan produk biomassa bahan bakar padat kering dengan nilai densitas energi yang tinggi sebagai hasil peningkatan senyawa karbon biomassa, dan penurunan senyawa oksigen dan

hidrogen biomassa (Manatura 2020). Hal ini berbeda dengan proses pirolisis yang membutuhkan suhu reaksi pembakaran sebesar 400°C - 600°C, dimana suhu tinggi tersebut berfungsi untuk mengekstraksi bahan bakar cair dari biomassa padat (Basu 2018). Beberapa penelitian menjelaskan bahwa produk biomassa memiliki sifat karakteristik yang lebih baik setelah proses torefaksi antara lain produk *pellet* serbuk kayu memiliki peningkatan nilai kalor dengan rentangan sebesar 23.2 MJ/kg – 25 MJ/kg setelah proses torefaksi (Kim *et al.* 2021). Produk serbuk kayu setelah proses torefaksi juga menghasilkan peningkatan kualitas dan kuantitas *syngas* (H<sub>2</sub>/CO) bersih ketika mengalami proses gasifikasi dikarenakan meningkatnya energi aktivasi *biochar* serbuk kayu yang menyebabkan kadar produk samping “tar” serbuk kayu menjadi sedikit (Zhang *et al.* 2021; Di Marcello *et al.* 2017). Peningkatan suhu torefaksi dengan rentangan suhu sebesar 270°C – 300°C juga mampu menurunkan *energy yield* dan *mass yield* dari briket serbuk kayu dengan menggunakan kontrol parameter ketebalan briket (Leontiev *et al.* 2018). Selain itu, biomassa dari hasil torefaksi memiliki struktur *hydrophobic* (Acharjee, Coronella, and Vasquez 2011), kadar oksigen rendah (Pestaño and Jose 2016), mudah disimpan dan didistribusikan (Bergman and Kiel 2005) serta menghasilkan sedikit asap pembakaran (Barskov *et al.* 2019). Beberapa penelitian tersebut telah memperbaiki kualitas serbuk kayu melalui proses torefaksi dengan sistem *batch* yang berfokus pada parameter eksperimental seperti suhu torefaksi dan waktu tinggal (*residence time*) serbuk kayu. Namun, proses torefaksi tersebut menggunakan gas nitrogen sebagai media gas *inert* yang menyebabkan biaya operasional torefaksi menjadi mahal. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan perancangan proses torefaksi menggunakan sistem *batch* dengan memanfaatkan produk gas torefaksi yang tidak terkondensasi sebagai produk hasil penguapan senyawa oksigen biomassa untuk media gas *inert*. Kondisi ini diharapkan dapat meningkatkan kualitas serbuk kayu sebagai bahan bakar padat alternatif, dan produk gas torefaksi sebagai media gas *inert* pengganti gas nitrogen, yang mana fungsinya mampu mempertahankan kualitas serbuk kayu yang optimal sebagai produk hasil proses torefaksi.

## Bahan dan Metode

Dampak negatif pengolahan konvensional serbuk kayu untuk dijadikan bahan bakar alternatif terhadap lingkungan menjadi faktor pengolahan serbuk kayu melalui proses torefaksi pada penelitian ini. Torefaksi merupakan proses termokimia pada rentangan suhu sebesar 200°C sampai dengan 300°C dengan tujuan untuk meningkatkan densitas energi biomassa (Basu

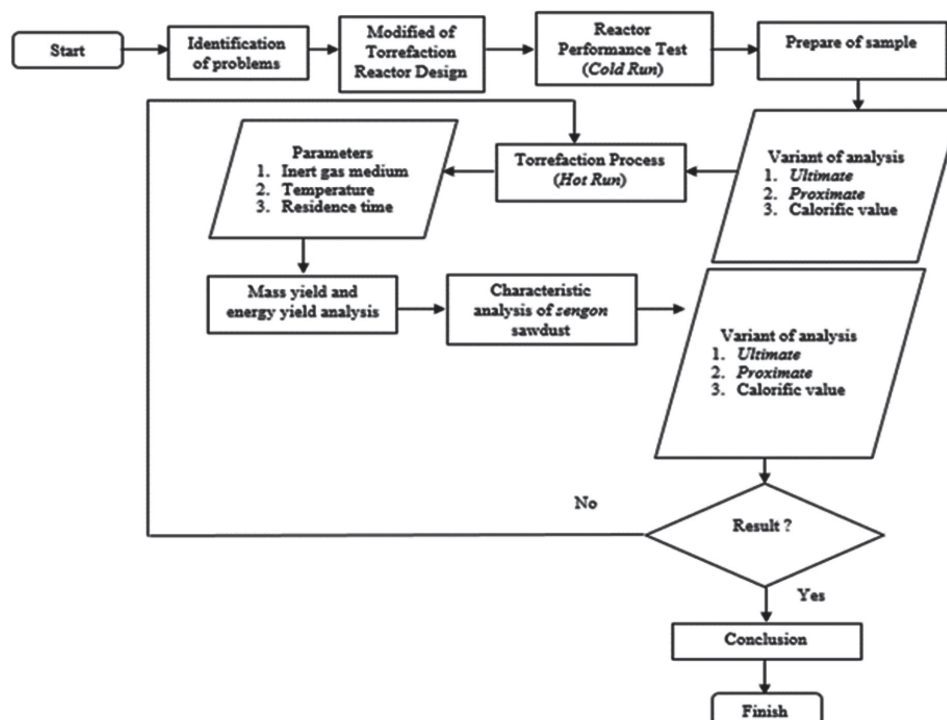


2018) dan nilai kalor biomassa (Samaksaman and Manatura 2021). Penelitian ini menggunakan tiga kondisi suhu antara lain suhu 260°C, 280°C, dan 300°C dikarenakan rentangan suhu tersebut terjadi proses dekomposisi eksotermik untuk melepas uap oksigen yang dikondensasikan maupun tidak dikondensasikan (Basu 2018). Torefaksi pada penelitian ini juga menggunakan dua media gas *inert* yang berbeda untuk dibandingkan kinerjanya antara gas nitrogen dan gas torefaksi sebagai hasil dari penguapan senyawa oksigen yang tidak terkondensasi. Pemanfaatan gas torefaksi sebagai media gas *inert* menjadi nilai keterbaruan dalam penelitian ini. Diagram alir metodologi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Proses torefaksi pada penelitian ini menggunakan reaktor tipe *batch* yang berkolerasi dengan waktu tinggal (*residence time*) serbuk kayu di dalam reaktor. Penelitian ini menggunakan waktu tinggal selama 30 menit dikarenakan waktu tersebut merupakan waktu optimal proses degradasi struktur hemiselulosa dan selulosa biomassa (Güney and Koyun 2020; Strandberg *et al.* 2015). Berdasarkan parameter-parameter tersebut, maka proses torefaksi serbuk kayu terbagi ke dalam dua langkah antara lain analisis karakteristik serbuk kayu sebelum dan sesudah proses torefaksi. Proses torefaksi serbuk kayu menggunakan reaktor torefaksi sesuai dengan Gambar 2. Reaktor torefaksi tersebut memiliki bagian ruang bakar, kondensor, dan lubang aliran media gas *inert*. Ruang bakat berfungsi untuk proses torefaksi serbuk kayu. Kondensor berfungsi untuk proses kondensasi gas torefaksi yang dihasilkan dari serbuk kayu. Lubang tersebut berfungsi sebagai

tempat aliran gas nitrogen maupun gas torefaksi hasil penguapan senyawa oksigen biomassa masuk ke dalam reaktor. *Blower* ditambahkan dalam rangkaian reaktor torefaksi dengan tujuan untuk membantu sirkulasi gas torefaksi ataupun gas nitrogen ke dalam reaktor dengan memanfaatkan tekanan udara.

Penelitian ini menggunakan serbuk kayu *Albasia*, dengan persentase sebesar 50.2% dari total produk kerajinan kayu di Banten sebesar 108548.45 m<sup>3</sup> (Badan Pusat Statistik 2017). Serbuk kayu tersebut dibuat dalam ukuran diameter seragam yakni sebesar 10 *Mesh*, dan dibagi ke dalam enam buah sampel dengan masing-masing sampel memiliki massa sebesar 300 gram. Pembagian enam buah sampel tersebut berdasarkan kondisi suhu torefaksi dan media gas *inert* yang digunakan dalam penelitian ini. Proses torefaksi serbuk kayu dapat dilihat pada Gambar 3. Analisis karakteristik serbuk kayu meliputi analisis *proximate*, *ultimate*, nilai kalor, *mass yield*, dan *energy yield* dilakukan sebelum dan setelah proses torefaksi. Analisis *ultimate* dan *proximate* bertujuan untuk mengukur komposisi senyawa penyusun serbuk kayu serta komposisi akhir hasil proses pembakaran serbuk kayu dalam kondisi tertentu. Analisis nilai kalor serbuk kayu bertujuan untuk menentukan pendekatan terhadap nilai kalor bahan bakar konvensional. Analisis *mass yield* dan *energy yield* bertujuan untuk menganalisis penurunan massa serbuk kayu. Massa serbuk kayu yang menurun memiliki keterkaitan dengan persentase penguapan kadar air serta jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguap kadar air tersebut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Tabel 1. Matriks parameter eksperimen torefaksi.

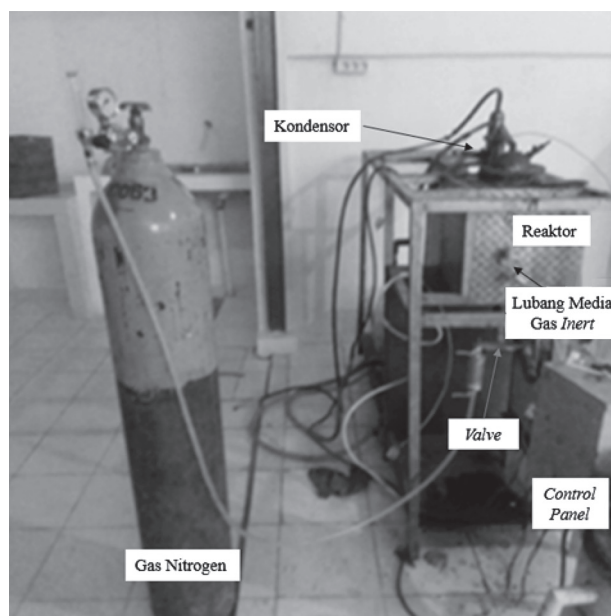
Sampel. No	Waktu Tinggal 30 Menit	Suhu (°C)			Media gas inert	
		260	280	300	Nitrogen	Torefaksi
1	✓	✓			✓	
2	✓		✓		✓	
3	✓			✓	✓	
4	✓	✓				✓
5	✓		✓			✓
6	✓			✓		✓

**Proses Torefaksi**

Proses torefaksi serbuk kayu menggunakan tiga variabel parameter antara lain suhu torefaksi, media gas inert, dan waktu tinggal, yang mana komposisi setiap parameter sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Matriks setiap komposisi parameter yang digunakan pada eksperimen torefaksi dapat dilihat pada Tabel 1.

Pengumpanan sampel serbuk kayu ke dalam reaktor dengan sistem batch memiliki mekanisme

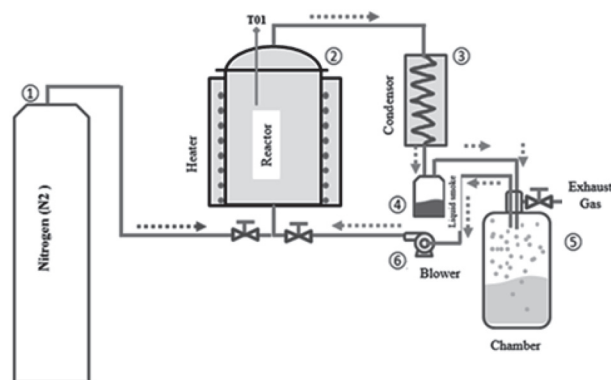
setiap kali sampel masuk ke dalam reaktor, maka proses torefaksi dilakukan sebanyak satu kali. Serbuk kayu menghasilkan produk antara lain gas torefaksi dan bahan bakar padat kering setiap proses torefaksi. Produk gas torefaksi mengalami proses kondensasi untuk digunakan sebagai bahan bakar cair yang ditampung di dalam bejana, sedangkan gas torefaksi yang tidak terkondensasi digunakan sebagai media gas inert untuk membantu proses torefaksi di dalam reaktor. Gas torefaksi tidak terkondensasi mampu meningkatkan efisiensi penguapan senyawa oksigen biomassa antara 35% sampai dengan 65% selama proses torefaksi (Sun et al. 2021). Selain itu, gas torefaksi juga mampu meningkatkan nilai kalor biomassa sebesar 17.9 MJ/kg sampai dengan 24.5 MJ/kg (Tong et al. 2018). Pengumpanan gas torefaksi ke dalam reaktor menggunakan tekanan udara blower (konveksi paksa) yang dilakukan setelah proses pemisahan gas torefaksi dengan volatile matter pada bagian vessel reaktor. Pengambilan sampel serbuk kayu yang telah kering di dalam reaktor dilakukan setelah 30 menit proses torefaksi untuk dilanjutkan analisis karakteristik serbuk kayu.



Gambar 2. Reaktor torefaksi.

**Analisis Karakteristik Serbuk Kayu**

Analisis karakteristik serbuk kayu antara lain analisis proximate, ultimate dan nilai kalor menggunakan standar SNI dan dilakukan saat sebelum dan setelah proses torefaksi. Analisis mass yield dan energy yield dilakukan setelah proses torefaksi. Analisis mass yield dan energy yield merupakan analisis karakteristik biomassa berdasarkan persentase massa kering biomassa dan energi yang dibutuhkan untuk menguapkan kadar air biomassa (González-Arias et al. 2022). Analisis ini tergantung dari kondisi suhu torefaksi dan waktu tinggal biomassa di dalam reaktor. Penentuan persentase mass yield ( $Y_{mass}$ ) dan energy yield ( $Y_{energy}$ ) menggunakan Persamaan 1 dan Persamaan 2 (Ahiduzzaman and Islam 2015; Iroba, Baik, and Tabil 2017).



Gambar 3. Metode eksperimen torefaksi serbuk kayu Albisia.

$$Y_{mass} = \frac{M_{product}}{M_{feed}} \cdot 100\% \tag{1}$$

$$Y_{energy} = Y_{mass} \cdot \frac{HHV_{product}}{HHV_{feed}} \tag{2}$$

Tabel 2. Nilai kalor bahan bakar.

No.	Tipe Bahan Bakar	Nilai Kalor (kkal/kg)
1.	Biomass (Neto <i>et al.</i> 2019)	5060
2.	Sawdust bricket (Czekala <i>et al.</i> 2018)	4311
3.	Animal waste bricket (Czekala <i>et al.</i> 2018)	4450
4.	Coals (Neto <i>et al.</i> 2019)	
	• Lignitic	3502-4614
	• Sub-bituminus	4614-6393
	• Bituminus	6393-7783
	• Antrasit	> 7783
5.	Acid extract (Neto <i>et al.</i> 2019)	7323
6.	Bio-oil (Neto <i>et al.</i> 2019)	8071

Dimana,  $HHV_{feed}$  merupakan nilai kalor dari serbuk kayu sebelum proses torefaksi (kJ/kg);  $HHV_{product}$  merupakan nilai kalor dari serbuk kayu setelah proses torefaksi (kJ/kg);  $M_{feed}$  adalah massa serbuk kayu sebelum proses torefaksi (gr); dan  $M_{product}$  adalah massa serbuk kayu setelah proses torefaksi (gr). Analisis nilai kalor serbuk kayu menggunakan metode standar ASTM D 5865-04 (International 2013a) dengan menggunakan alat Bom Kalorimeter LECO AC 500. Prinsip kerja bom kalorimeter adalah setiap jumlah sampel serbuk kayu yang ditempatkan di dalam gelas *stainless steel* dimasukkan ke dalam wadah berisi air bertekanan tinggi dalam kondisi lingkungan yang stabil. Wadah diisi dengan oksigen untuk proses pembakaran dengan memanfaatkan fenomena percikan listrik. Perbedaan suhu air dalam wadah akibat kenaikan suhu dibaca oleh termometer listrik dan dihitung oleh komputer sehingga terhitung nilai kalor serbuk kayu. Perbandingan nilai kalor beberapa bahan bakar biomassa dan bahan bakar konvensional juga menjadi pertimbangan dalam klasifikasi serbuk kayu hasil torefaksi sebagai bahan bakar alternatif, yang mana dapat dilihat pada Tabel 2.

Analisis *proximate* menggunakan metode standar ASTM D 3173-11 untuk menganalisis kadar air serbuk kayu (International 2013b). ASTM D 3174-11 untuk analisis kadar abu, ISO 562-2010 (E) untuk analisis kadar *volatile matter*, dan ASTM 3172-07a untuk analisis *fixed carbon*. Analisis *ultimate* dikategorikan ke dalam analisis senyawa karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sulfur. Kadar karbon, hidrogen, oksigen, dan nitrogen menggunakan metode standar ASTM D 5373-02, sedangkan kadar sulfur menggunakan metode standar ASTM D 4239-08. Keseluruhan analisis *ultimate* menggunakan analisis infra merah (International 2013c).

Tabel 3. Karakteristik serbuk kayu *Albasia* sebelum proses torefaksi.

No.	Analisis	Parameter	Kuantitas
1.	Nilai Kalor	<i>Gross Calorific Value</i>	4002 kkal/kg
2.	<i>Proximate</i> (%) adb	Kadar Air	12.78 %
		Kadar Abu	1.02 %
		<i>Volatile matter</i>	71.51 %
3.	<i>Ultimate</i> (%) adb	<i>Fixed carbon</i>	14.69 %
		Sulphur	0.36 %
		Karbon	43.43 %
		Hidrogen	6.58 %
		Nitrogen	0.4 %
		Oksigen	48.21 %

### Hasil dan Pembahasan

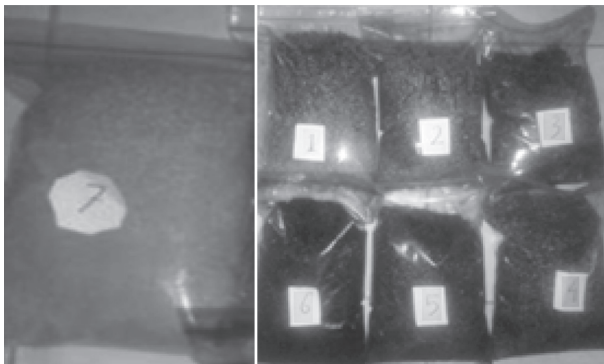
Proses torefaksi serbuk kayu *Albasia* menggunakan kondisi suhu yang berbeda antara lain suhu 260°C, 280°C, dan 300°C pada reaktor torefaksi tipe *batch*. Proses ini menggunakan waktu tinggal (*residence time*) serbuk kayu di dalam reaktor selama 30 menit sebagai waktu optimal untuk proses degradasi senyawa hemiselulosa dan selulosa serbuk kayu. Proses torefaksi juga menggunakan media gas *inert* untuk menurunkan senyawa oksigen dan hidrogen yang berasal dari biomassa di dalam reaktor selama proses torefaksi. Media gas *inert* yang digunakan terbagi menjadi dua tipe yaitu gas nitrogen dan gas torefaksi tidak terkondensasi. Karakteristik serbuk kayu *Albasia* sebagai bahan baku torefaksi juga dianalisis melalui analisis *ultimate*, *proximate*, dan nilai kalor sebelum proses torefaksi. Hasil analisis karakteristik serbuk kayu tersebut dapat dilihat pada data Tabel 3.

Data Tabel 3 menjelaskan karakteristik awal serbuk kayu memiliki kelembaban kurang dikarenakan persentase kadar airnya sebesar 12.78% dan termasuk ke dalam kategori bahan bakar kering. Namun, persentase *volatile matter* serbuk kayu yang tinggi sebesar 71.51% membuat pembakaran serbuk kayu tidak optimal akibat kandungan partikel terbang yang banyak saat proses pembakaran tidak sempurna. Zat partikel terbang yang tinggi menyebabkan pencemaran udara dan mengganggu kesehatan masyarakat. Persentase komposisi *fixed carbon* sebesar 14.69% juga berpengaruh negatif terhadap proses pembakaran serbuk kayu karena membuat proses pembakaran singkat dan nilai kalor serbuk kayu tidak optimal. Persentase kadar karbon serbuk kayu yang terbatas tersebut masih menyebabkan gangguan reaksi kimia pembakaran antara oksigen, bahan bakar, dan panas sebelum dilakukan proses torefaksi. Produk serbuk kayu *Albasia* secara visual dapat dilihat pada Gambar 4 baik dalam kondisi

sebelum dan setelah proses torefaksi.

Torefaksi sebagai proses termokimia dapat mengurangi dampak negatif pembakaran langsung serbuk kayu, dan mampu meningkatkan sifat karakteristik serbuk kayu. Hasil torefaksi serbuk kayu dapat dilihat pada Gambar 4(b) yang terdiri dari tiga buah sampel dengan media gas *inert* gas nitrogen (Sampel 1 sampai dengan Sampel 3), dan tiga buah sampel dengan media gas *inert* gas torefaksi (Sampel 4 sampai dengan Sampel 6). Berdasarkan visualisasi dapat dijelaskan bahwa visual serbuk kayu dengan gas torefaksi lebih gelap dibandingkan dengan gas nitrogen karena pengaruh distribusi *volatile matter* yang terkandung di dalam gas torefaksi untuk mengalami proses reaksi kimia kedua (*secondary reactions*) terhadap serbuk kayu melalui reaksi antara H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> dan serbuk kayu. Adapun, distribusi *volatile matter* tersebut dipengaruhi oleh tekanan udara *blower* yang digunakan untuk membawa aliran gas torefaksi ke dalam reaktor.

Parameter *mass yield* dan *energy yield* pada proses torefaksi dengan tiga kondisi suhu yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil *mass yield* dan *energy yield* merupakan hasil perhitungan Persamaan (1) dan Persamaan (2). Gambar 5(a) menjelaskan penurunan *mass yield* yang



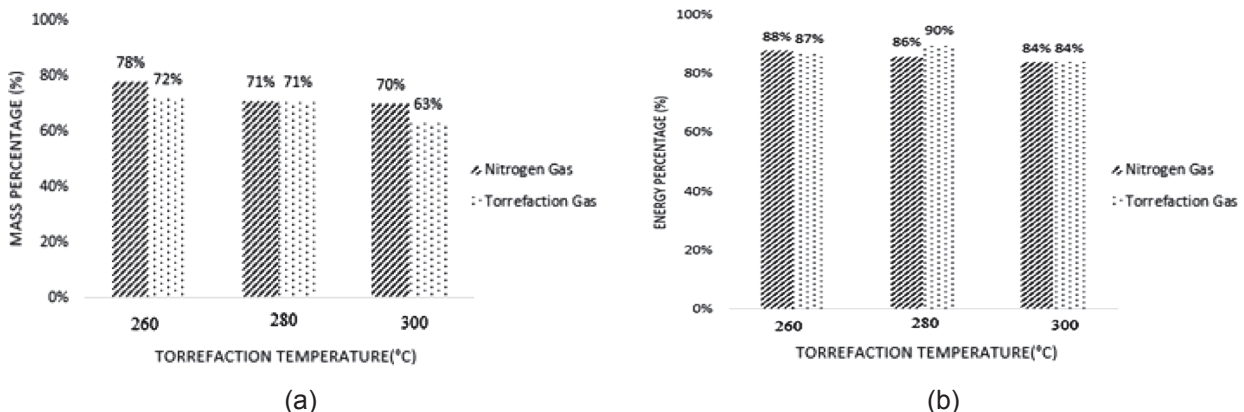
(a) (b)

Gambar 4. Serbuk kayu *Albasia* mentah (a) dan hasil torefaksi (b).

disebabkan oleh proses devolatilisasi senyawa penyusun serbuk kayu antara lain hemiselulosa dan selulosa seiring dengan peningkatan suhu torefaksi. Proses devolatilisasi hemiselulosa terjadi akibat kadar oksigen parsial senyawa hemiselulosa menguap dan dikonsumsi secara keseluruhan untuk degradasi *thermal* selama proses torefaksi berlangsung yang mengarah ke reaksi eksotermis. Oleh karena itu, pada suhu batas atas torefaksi (suhu 300°C) berat unsur hemiselulosa tersisa sedikit untuk dilanjutkan ke proses pirolisis yang membutuhkan energi ekstra dari sekitarnya, sehingga suhu reaksi endotermiknya rendah. Unsur selulosa juga mengalami proses devolatilisasi selama proses torefaksi serbuk kayu, akan tetapi pada suhu batas atas torefaksi (suhu 300°C) berat unsur selulosa yang tersisa masih sebesar 50% dari berat total keseluruhan selulosa serbuk kayu. Kondisi ini membuat suhu reaksi endotermik selulosa lebih tinggi dibandingkan dengan hemiselulosa. Fenomena ini dapat menunjukkan bahwa penurunan *mass yield* serbuk kayu selama proses torefaksi terbentuk oleh karena adanya devolatilisasi keseluruhan unsur hemiselulosa dan devolatilisasi sebagian unsur selulosa serbuk kayu.

Persentase *mass yield* terendah terjadi pada suhu 300°C baik untuk media gas *inert* nitrogen dan gas torefaksi dengan persentase masing-masing sebesar 70% dan 63%. Hasil ini menjelaskan bahwa pemanfaatan gas torefaksi sangat berpengaruh terhadap penurunan *mass yield* serbuk kayu. Selain itu, hal ini juga didukung oleh faktor senyawa oksigen dan karbon dioksida yang terdapat pada gas torefaksi untuk mengalami reaksi kimia terhadap serbuk kayu kering untuk menciptakan gas torefaksi (*Boudouard Reaction*) yang digunakan kembali selama proses torefaksi. Selama reaksi kimia tersebut komponen serbuk kayu juga menyaring partikel gas yang berbahaya bagi lingkungan.

Persentase *energy yield* proses torefaksi serbuk kayu juga menurun dengan meningkatnya suhu torefaksi yang dapat dilihat pada Gambar 5(b). Kondisi penurunan *energy yield* pada suhu 260°C



Gambar 5. *Solid yield* (a) dan *Energy yield* (b).

Tabel 4. Nilai kalor serbuk kayu *Albasia* setelah proses torefaksi.

Sampel No.	Waktu Tinggal (menit)	Suhu (°C)	Gas <i>Inert</i>	Massa Sampel (gram)		Kalor (kkal/kg)
				Sebelum	Sesudah	
1	30	260	Nitrogen	100	74.37	4548
2	30	280	Nitrogen	100	69.26	4753
3	30	300	Nitrogen	100	64.40	4856
4	30	260	Torefaksi	100	66.98	4832
5	30	280	Torefaksi	100	65.54	5078
6	30	300	Torefaksi	100	55.94	5350

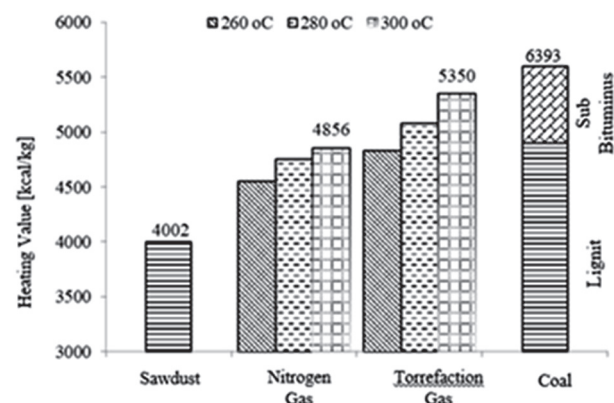
dan 300°C dapat terlihat jika penurunan *energy yield* dengan gas torefaksi lebih rendah dibandingkan dengan gas nitrogen. Hal ini dipengaruhi oleh tingginya fraksi mol oksigen pada gas torefaksi untuk proses reaksi kimia terhadap serbuk kayu. Namun, ditemukan bahwa kondisi persentase *energy yield* gas torefaksi lebih tinggi dibandingkan dengan gas nitrogen pada suhu 280°C. Kondisi tingginya persentase *energy yield* pada suhu 280°C disebabkan oleh berkurangnya fraksi mol oksigen yang dikandung oleh gas torefaksi untuk proses reaksi kimia kedua (*secondary reaction*) terhadap serbuk kayu di dalam reaktor. Berkurangnya fraksi mol oksigen pada gas torefaksi disebabkan oleh penguapan senyawa oksigen yang bersamaan dengan penurunan *mass yield* serbuk kayu terikut ke gas torefaksi yang terkondensasi menjadi bahan bakar cair, sedangkan sisa fraksi mol oksigen yang ikut ke gas torefaksi tidak terkondensasi memiliki persentase yang lebih sedikit. Secara umum penurunan *energy yield* antara gas nitrogen dan gas torefaksi pada suhu 260°C dan 300°C memiliki pola yang sama, sehingga gas torefaksi tersebut dapat digunakan untuk proses torefaksi.

Nilai kalor serbuk kayu *Albasia* yang rendah dapat ditingkatkan melalui proses torefaksi. Hasil nilai kalor serbuk kayu setelah proses torefaksi dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 6. Nilai kalor tersebut menggunakan Nilai Kalor Bruto (CGV) dalam satuan udara kering (asb). Tabel 4 menjelaskan bahwa peningkatan nilai kalor serbuk kayu seiring dengan peningkatan suhu torefaksi dan perubahan media gas *inert*. Nilai kalor serbuk kayu tertinggi sebesar 5350 kkal/kg pada suhu 300°C dengan menggunakan gas torefaksi. Kondisi ini masuk ke dalam klasifikasi batubara dengan sub-kategori sub-bituminus (4616 kkal/kg – 6393 kkal/kg) sesuai dengan Gambar 6. Kenaikan nilai kalor serbuk kayu disebabkan oleh menurunnya senyawa oksigen dan hidrogen yang dikonversi menjadi gas torefaksi yang terkondensasi maupun tidak terkondensasi selama proses torefaksi, sehingga menyisakan kandungan karbon padat pada serbuk kayu. Hal ini dapat dibuktikan dengan massa serbuk kayu terendah (55.94 gram) yang terjadi pada suhu 300°C. Massa residu serbuk kayu yang kering dengan menyisakan komposisi karbon

padat tersebut mampu meningkatkan parameter nilai kalor serbuk kayu.

Parameter analisis *proximate* serbuk kayu setelah proses torefaksi dapat dilihat pada Tabel 5, dimana suhu torefaksi dan media gas *inert* mempengaruhi perubahan karakteristik *proximate* serbuk kayu. Tabel 5 menjelaskan bahwa penurunan kadar air serbuk kayu disebabkan oleh peningkatan suhu torefaksi, sehingga membuat struktur serbuk kayu menjadi kering. Puncak penurunan kadar air terjadi pada suhu 300°C, dimana persentase kadar air serbuk kayu hanya sebesar 3.84% pada suhu tersebut. Senyawa *volatile matter* juga menurun secara signifikan pada suhu 300°C, dimana persentase sisa *volatile matter* mencapai 60.97%. Kondisi ini terjadi karena proses degradasi hemiselulosa dan selulosa yang melepas senyawa oksigen dan hidrogen membentuk gas torefaksi serta menyisakan senyawa karbon tetap di dalam serbuk kayu. Sisa senyawa karbon tetap yang terdapat di dalam serbuk kayu dapat diketahui dari meningkatnya persentase *fixed carbon* yang mencapai 33.35%. Peningkatan persentase massa *fixed carbon* juga tidak terlepas dari pengaruh gas torefaksi yang digunakan untuk reaksi kimia dengan serbuk kayu kering selama proses torefaksi.

Hasil analisis *ultimate* serbuk kayu setelah proses torefaksi dapat dilihat pada Tabel 6. Analisis *ultimate* mengukur senyawa karbon, nitrogen, hidrogen, oksigen, dan sulfur. Hasil analisis *ultimate* berkaitan dengan analisis *proximate*, dimana peningkatan

Gambar 6. Nilai kalor serbuk kayu *Albasia* setelah proses torefaksi.

Tabel 5. Analisis *proximate* serbuk kayu *Albasia* setelah proses torefaksi.

Sampel No.	Waktu Tinggal (menit)	Suhu (°C)	Gas <i>Inert</i>	Analisis <i>Proximate</i> (%) w.b.			
				Moisture Content	Ash	Volatile Matter	Fixed Carbon
1	30	260	Nitrogen	4.92	1.12	75.33	18.63
2	30	280	Nitrogen	4.64	2.04	71.28	22.04
3	30	300	Nitrogen	4.54	1.51	69.08	24.87
4	30	260	Torefaksi	4.31	1.68	70.02	23.81
5	30	280	Torefaksi	4.16	1.58	66.91	27.35
6	30	300	Torefaksi	3.84	1.84	60.97	33.35

Tabel 6. Analisis *ultimate* serbuk kayu *Albasia* setelah proses torefaksi.

Sampel No.	Waktu Tinggal (menit)	Suhu (°C)	Gas <i>Inert</i>	Analisis <i>Ultimate</i> (%) w.b				
				Sulfur	Karbon	Hidrogen	Nitrogen	Oksigen
1	30	260	Nitrogen	0.48	49.15	6.19	0.37	42.71
2	30	280	Nitrogen	0.14	50.95	6.11	0.34	40.42
3	30	300	Nitrogen	0.10	52.15	6.10	0.35	39.79
4	30	260	Torefaksi	0.11	52.08	5.99	0.44	39.70
5	30	280	Torefaksi	0.12	54.45	5.94	0.44	37.46
6	30	300	Torefaksi	0.15	57.48	5.72	0.44	34.37

*fixed carbon* disebabkan peningkatan senyawa karbon. Peningkatan senyawa karbon seiring dengan peningkatan suhu torefaksi, dimana pada suhu 300°C mampu menghasilkan senyawa karbon sebesar 57.48%. Peningkatan senyawa karbon juga menandakan penurunan senyawa oksigen dan hidrogen yang terkonversi ke dalam bentuk gas torefaksi. Hal ini menandakan, bahwa proses torefaksi dapat meningkatkan karakteristik serbuk kayu menjadi bahan bakar padat alternatif.

### Simpulan

Suhu torefaksi sebesar 300°C mampu mereduksi senyawa oksigen dan hidrogen serbuk kayu masing-masing sebesar 34.37% dan 5.72%. Selain itu, suhu tersebut juga mampu mereduksi unsur *volatile matter* serbuk kayu sebesar 60.97%. Senyawa oksigen dan hidrogen yang tereduksi merupakan produk hasil degradasi unsur hemiselulosa dan selulosa pada suhu 300°C yang kemudian dikonversi ke dalam bentuk gas torefaksi tak terkondensasi untuk dimanfaatkan dalam proses torefaksi. Pemanfaatan gas torefaksi tersebut sebagai media gas *inert* pada suhu sebesar 300°C mampu meningkatkan senyawa karbon serbuk kayu mencapai 57.48% dan unsur *fixed carbon* sebesar 33.35%, sehingga dapat dikategorikan bahwa serbuk kayu tersebut merupakan bahan bakar padat bersifat kering. Kadar karbon serbuk kayu yang tinggi mempengaruhi peningkatan nilai kalor serbuk kayu menjadi 5350 kkal/kg (adb), dan masuk ke dalam kategori bahan bakar batu bara sub-bituminus. Sehingga, hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa proses torefaksi mampu

meningkatkan sifat karakteristik serbuk kayu sebagai bahan bakar alternatif.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih terhadap Fakultas Teknik Universitas Pancasila yang memberikan Dana Hibah Internal yang tertuang pada Surat No. 1125/D/FTUP/V/2019, Staff Laboran Teknik Mesin, Universitas Pancasila, dan Staff Laboran Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian Energi dan Sumber Daya Alam Republik Indonesia.

### Daftar Pustaka

- Abbasi, H., F. Rahimpour, F. Pourfayaz, and A. Kasaeian. 2019. Evaluating Integration of Biomass Gasification Process with Solid Oxide Fuel Cell and Torrefaction Process. *Journal of Thermal Engineering* Vol.5 (6): 230–239. <https://doi.org/10.18186/thermal.654637>.
- Acharjee, T.C., C.J. Coronella, and V.R. Vasquez. 2011. Effect of Thermal Pretreatment on Equilibrium Moisture Content of Lignocellulosic Biomass. *Bioresource Technology* Vol.102 (7): 4849–4854. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.018>.
- Ahiduzzaman, Md., and A.K.M.S. Islam. 2015. Energy Yield of Torrefied Rice Husk at Atmospheric Condition. *Procedia Engineering* Vol.105: 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.062>.

- Ahmed, A., M.S.A. Bakar, R.S. Sukri, M. Hussain, A. Farooq, S. Moogi, and Y.K. Park. 2020. Sawdust Pyrolysis from the Furniture Industry in an Auger Pyrolysis Reactor System for Biochar and Bio-Oil Production. *Energy Conversion and Management* Vol.226: 113502. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113502>.
- Badan Pusat Statistik, Indonesia. 2017. *Statistics of Forestry Product*. Jakarta.
- Barskov, S., M. Zappi, P. Buchireddy, S. Dufreche, J. Guillory, D. Gang, R. Hernandez, et al. 2019. Torrefaction of Biomass: A Review of Production Methods for Biocoal from Cultured and Waste Lignocellulosic Feedstocks. *Renewable Energy* Vol.142: 624–642. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.068>.
- Basu, P. 2018. Torrefaction. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*, 3rd ed., 93–154. Cambridge: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0/00004-2>.
- Basu, P. 2018. Pyrolysis. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*, 3rd ed., 155–186. Cambridge: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00005-4>.
- Bergman, P.C.a., and J.H.a. Kiel. 2005. Torrefaction for Biomass Upgrading. *Proceedings of the 14th European Biomass Conference, Paris, October 17–21, 2015*. p.17-21. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Torrefaction+for+biomass+upgrading#0>.
- Czekala, W., S. Bartnikowska, J. Dach, D. Janczak, A. Smurzyńska, K. Kozłowski, A. Bugala, et al. 2018. The Energy Value and Economic Efficiency of Solid Biofuels Produced from Digestate and Sawdust. *Energy* Vol.159: 1118–1122. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.090>.
- González-Arias, J., X. Gómez, M. González-Castaño, M.E. Sánchez, J.G. Rosas, and J. Cara-Jiménez. 2022. Insights into the Product Quality and Energy Requirements for Solid Biofuel Production: A Comparison of Hydrothermal Carbonization, Pyrolysis and Torrefaction of Olive Tree Pruning. *Energy* Vol.238: 122022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122022>.
- Güney, O.F., and A. Koyun. 2020. Experimental Analysis and Kinetic Modelling for Steam Gasification of the Turkish Lignites. *Journal of Thermal Engineering* Vol.6(3): 204–213. <https://doi.org/10.18186/THERMAL.711324>.
- International, ASTM. 2013a. “Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke 1.” D5865 - 13 Standard. West Conshohocken. <https://doi.org/10.1520/D5865-13>.
- . 2013b. “Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke.” D3173 / D3173M - 17a. West Conshohocken. [https://doi.org/10.1520/D3173\\_D3173M-17A](https://doi.org/10.1520/D3173_D3173M-17A).
- . 2013c. “Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke.” D5373 - 21. West Conshohocken. <https://doi.org/10.1520/D5373-21>.
- Iroba, K.L., O.D. Baik, and L.G. Tabil. 2017. Torrefaction of Biomass from Municipal Solid Waste Fractions I: Temperature Profiles, Moisture Content, Energy Consumption, Mass Yield, and Thermochemical Properties. *Biomass and Bioenergy* Vol.105: 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.009>.
- Kementerian Kehutanan, Republik Indonesia. 2015. “Statistic of Ministry of Environment and Forestry.” Jakarta.
- Kim, S.J., S. Park, K.C. Oh, Y.M. Ju, L.H. Cho, and D.H. Kim. 2021. Development of Surface Torrefaction Process to Utilize Agro-Byproducts as an Energy Source. *Energy* Vol.233: 121192. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121192>.
- Leontiev, A., B. Kichatov, A. Korshunov, A. Kiverin, N. Medvetskaya, and K. Melnikova. 2018. Oxidative Torrefaction of Briquetted Birch Shavings in the Bentonite. *Energy* Vol.165: 303–313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.103>.
- Manatura, K. 2020. Inert Torrefaction of Sugarcane Bagasse to Improve Its Fuel Properties. *Case Studies in Thermal Engineering* Vol.19: 100623. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100623>.
- Marcello, M. di, G.A. Tsalidis, G. Spinelli, W. de Jong, and J.H.A. Kiel. 2017. Pilot Scale Steam-Oxygen CFB Gasification of Commercial Torrefied Wood Pellets. The Effect of Torrefaction on the Gasification Performance. *Biomass and Bioenergy* Vol.105: 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.005>.
- Neto, C.J.D., L.A.J. Letti, S.G. Karp, F.M.D. Vítola, and C.R. Soccol. 2019. Production of Biofuels from Algae Biomass by Fast Pyrolysis. In *Biofuels from Algae, Second Edi*, 461–473. Amsterdam: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64192-2.00018-4>.
- Nunes, L.J.R., J.C. de O. Matias, and J.P. da S. Catalão. 2018. Biomass Torrefaction Process. In *Torrefaction of Biomass for Energy Applications*, 1st ed., 89–124. Cambridge: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809462-4.00003-1>.
- Pestaño, L.D.B., and W.I. Jose. 2016. Production of Solid Fuel by Torrefaction Using Coconut Leaves As Renewable Biomass. *International Journal of Renewable Energy Development* Vol.5 (3): 187–197. <https://doi.org/10.14710/ijred.5.3.187-197>.
- Samaksaman, U., and K. Manatura. 2021. Co-Combustion Characteristics and Kinetics Behavior of Torrefied Sugarcane Bagasse and Lignite. *International Journal of Renewable Energy Development* Vol.10 (4): 737–746. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.37249>.

- Strandberg, M., I. Olofsson, L. Pommer, S. Wiklund-Lindström, K. Åberg, and A. Nordin. 2015. Effects of Temperature and Residence Time on Continuous Torrefaction of Spruce Wood. *Fuel Processing Technology* Vol.134: 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.02.021>.
- Sun, Y., S. Tong, X. Li, F. Wang, Z. Hu, O.D. Dacres, E.M.A. Edreis, et al. 2021. Gas-Pressurized Torrefaction of Biomass Wastes: The Optimization of Pressurization Condition and the Pyrolysis of Torrefied Biomass. *Bioresource Technology* Vol.319: 124216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124216>.
- Tong, S., L. Xiao, X. Li, X. Zhu, H. Liu, G. Luo, N. Worasuwannarak, S. Kerdsuwan, B. Fungtammasan, and H. Yao. 2018. A Gas-Pressurized Torrefaction Method for Biomass Wastes. *Energy Conversion and Management* Vol.173: 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.051>.
- Tumuluru, J.S., S. Sokhansanj, C.T. Wright, R.D. Boardman, and R.J. Hess. 2011. "Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development." *In American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2011*, ASABE 2011, 7:5886–5924. Louisville: Idaho National Laboratory. <https://doi.org/10.13031/2013.37192>.
- Wannapeera, J., B. Fungtammasan, and N. Worasuwannarak. 2011. Effects of Temperature and Holding Time during Torrefaction on the Pyrolysis Behaviors of Woody Biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* Vol.92(1): 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.04.010>.
- Yasin, M., K. Jabran, I. Afzal, S. Iqbal, M.A. Nawaz, A. Mahmood, M. Asif, et al. 2020. Industrial Sawdust Waste: An Alternative to Soilless Substrate for Garlic (*Allium Sativum* L.). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* Vol.18: 100252. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100252>.
- Zhang, R., J. Zhang, W. Guo, Z. Wu, Z. Wang, and B. Yang. 2021. Effect of Torrefaction Pretreatment on Biomass Chemical Looping Gasification (BCLG) Characteristics: Gaseous Products Distribution and Kinetic Analysis. *Energy Conversion and Management* Vol.237: 114100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114100>.