

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN  
WAKTU TINGGAL PADA PROSES TOREFAKSI *WOOD CHIP*  
MAHONI MENGGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE  
TUBULAR DENGAN SISTEM PEMANAS *OIL JACKET***

**SKRIPSI**

**Oleh**

**MUHAMMAD FATHAN NURSALAM**

**2115021088**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN  
WAKTU TINGGAL PADA PROSES TOREFAKSI *WOOD CHIP*  
MAHONI MENGGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE  
TUBULAR DENGAN SISTEM PEMANAS *OIL JACKET***

**Oleh**

**MUHAMMAD FATHAN NURSALAM**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

## ABSTRAK

### STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL PADA PROSES TOREFAKSI *WOOD CHIP* MAHONI MENGGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR DENGAN SISTEM PEMANAS *OIL JACKET*

Oleh

**Muhammad Fathan Nursalam**

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi temperatur dan waktu tinggal pada proses torefaksi *wood chip* mahoni (*Swietenia macrophylla*) menggunakan reaktor kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas oil jacket. Torefaksi dilakukan pada temperatur 250, 275, dan 300°C dengan waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit untuk mengevaluasi perubahan kualitas bahan bakar padat melalui parameter nilai kalor, analisis proksimat (*moisture content, volatile matter, ash, fixed carbon*), *mass yield, energy yield*, serta ketahanan serap air (hidrofobisitas). Hasil menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan waktu tinggal meningkatkan derajat devolatilisasi dan deoksigenasi sehingga nilai kalor cenderung meningkat, terutama pada temperatur tinggi dan waktu tinggal lebih lama. Sebaliknya, *mass yield* menurun seiring meningkatnya keparahan proses akibat konversi fraksi volatil menjadi gas dan tar, penurunan paling besar terjadi pada temperatur 300 °C hingga mencapai kisaran sekitar 52% pada waktu tinggal 30 menit. *Energy yield* juga menurun dari kondisi awal, mencerminkan kompromi antara peningkatan densitas energi padatan dan kehilangan massa selama proses. Selain itu, torefaksi meningkatkan hidrofobisitas, ditunjukkan oleh penurunan *water uptake* pada sampel dengan temperatur dan waktu tinggal yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, kombinasi temperatur–waktu tinggal pada rentang 250 - 300 °C berpotensi meningkatkan kualitas *wood chip* mahoni sebagai bahan bakar padat alternatif dengan mempertimbangkan antara peningkatan nilai kalor dan penurunan rendemen.

Kata Kunci: Torefaksi, *wood chip* mahoni, reaktor kontinu tubular, temperature, waktu tinggal, nilai kalor, analisis proksimat, *mass yield, energy yield*, hidrofobisitas.

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF TEMPERATURE AND RESIDENCE TIME VARIATIONS IN THE TORREFACTION OF MAHOGANY WOOD CHIPS USING A CONTINUOUS TUBULAR REACTOR WITH AN OIL JACKET HEATING SYSTEM**

**By**

**MUHAMMAD FATHAN NURSALAM**

*This study investigates the effects of torrefaction temperature and residence time on mahogany wood chips (*Swietenia macrophylla*) using a continuous tubular reactor with an oil-jacket heating system. Torrefaction was conducted at 250, 275, and 300°C with residence times of 10, 20, and 30 minutes. Fuel quality was evaluated through calorific value, proximate analysis (moisture content, volatile matter, ash, fixed carbon), mass yield, energy yield, and water uptake (hydrophobicity). The results indicate that increasing temperature and residence time enhances devolatilization and deoxygenation, leading to a general increase in calorific value, particularly at higher severity conditions. In contrast, mass yield decreases with increasing severity due to progressive conversion of reactive components into permanent gases and condensable vapors; the most pronounced reduction occurred at 300 °C, reaching approximately 52% at 30 minutes. Energy yield also declines compared with the raw material, highlighting the trade-off between improved energy density of the solid product and overall energy retention as mass is lost. Torrefaction further improves hydrophobicity, evidenced by reduced water uptake at higher temperatures and longer residence times. Overall, operating within 250–300 °C provides an effective pathway to upgrade mahogany wood chips into a more coal-like solid fuel, while requiring optimization to balance calorific value enhancement against yield losses.*

*Keyword: Torrefaction, mahogany wood chips, continuous tubular reactor, temperature, residence time, calorific value, proximate analysis, mass yield, energy yield, hydrophobicity.*

Judul Skripsi : **STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL PADA PROSES TOREFAKSI *WOOD CHIP* MAHONI MENGGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE TURBULAR DENGAN SISTEM PEMANAS *OIL JACKET***

Nama Mahasiswa : **muhammad fathan nursalam**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2115021088**

Program Studi : **S1 Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Pembimbing I

Pembimbing II

**Dr. Amrul, S.T., M.T.**

NIP. 197103311999031003

**Hadi Prayitno, S.T., M.T.**

NIP. 198805142019031012

**MENGETAHUI**

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

**Ahmad Su'udi, S.T., M.T.**

NIP. 197408162000121001

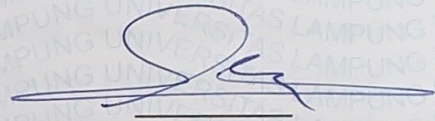
**Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.**

NIP. 197908212003121003

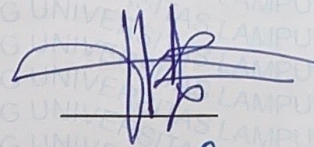
**MENGESAHKAN**

1. Tim penguji

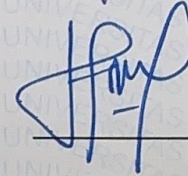
Ketua Penguji : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**



Anggota Penguji : **Hadi Prayitno, S.T., M.T.**



Penguji Utama : **Dr. Harmen, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



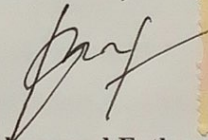
**Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.**  
NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **25 februari 2026**

## LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul “**Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tinggal Pada Proses Torefaksi *Wood chip* Mahoni Menggunakan Reaktor Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket***” ini dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur dalam pasal 36 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Peraturan Rektor No. 13 Tahun 2019.

Bandar Lampung, 10 Maret 2026  
Pembuat Pernyataan,



**Muhammad Fathan Nursalam**

NPM. 2115021088



## RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir di Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada 09 Januari 2003, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Ibu Yeni Hartati dan Bapak Hermansyah. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 2 Perumnas Way Halim hingga tahun 2015, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di MTsN 2 Bandar Lampung yang selesai pada tahun 2018, dan melanjutkan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 05 Bandar Lampung, dan lulus pada tahun 2021.

Pada tahun 2021, penulis melanjutkan studi S1 Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama proses perkuliahan, penulis aktif tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) pada Divisi Olahraga. Penulis berkesempatan untuk melakukan Kerja Praktek (KP) pada tahun 2025 di PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkit Sebalang, Lampung Selatan. dengan judul laporan “**Analisis Pengaruh Proses *Plugging* Pada *High Pressure Heater 2 Tipe Shell And Tube* Terhadap Efektivitas Alat Penukar Kalor di PT. PLN Nusantara Power UP Sebalang**”.

Pada tahun 2026 penulis menyelesaikan program studi S1 Teknik Mesin dengan judul skripsi “**Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tinggal Pada Proses Torefaksi *Wood chip* Mahoni Menggunakan Reaktor Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket***”, di bawah bimbingan bapak Dr. Amrul, S.T., M.T., Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T., serta Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. sebagai pembahas.

## **MOTTO**

“Apa yang melewatkanmu tidak akan pernah menjadi takdirku, dan apa yang ditakdirkan untukku tidak akan pernah melewatkanmu.”

**(Umar Bin Khattab)**

“Tiada kekayaan yang lebih utama daripada akal, tiada keadaan yang lebih menyedihkan daripada kebodohan, dan tiada warisan yang lebih baik daripada Pendidikan.”

**(Ali Bin Abi Thalib)**

“Bila kaum muda yang telah belajar menganggap dirinya terlalu tinggi dan pintar untuk melebur dengan Masyarakat yang bekerja dengan cangkul dan hanya memiliki cita – cita yang sederhana. Maka lebih baik Pendidikan itu tidak diberikan sama sekali.”

**(Tan Malaka, Madilog)**

## HALAMAN PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat, karunia, dan kemudahan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan sepanjang zaman.

### **KARYA TULIS INI PENULIS PERSEMBAHKAN KEPADA:**

#### **Ibunda dan Ayahanda Tercinta**

Yang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasiku. Terima kasih atas cinta, doa, dukungan, serta pengorbanan tanpa henti yang tidak akan pernah bisa penulis balas sepenuhnya. Segala pencapaian ini adalah buah dari doa dan usaha kalian.

#### **Seluruh Keluarga Besar Teknik Mesin Angkatan 2021**

Teman seperjuangan yang telah menemani dalam suka dan duka, berbagi ilmu, tawa, dan semangat selama masa perkuliahan hingga akhirnya kita sampai di titik ini.

Serta

Almamater Tercinta, Universitas Lampung dan Jurusan Teknik Mesin

## UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh.

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini dalam keadaan sehat dan lancar. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wasallam, suri teladan bagi seluruh umat, beserta keluarga, para sahabat, dan pengikut beliau hingga akhir zaman. Semoga kita semua mendapatkan syafaat beliau di hari pembalasan kelak. Skripsi ini disusun sebagai bentuk akhir dari pelaksanaan kegiatan penelitian dan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Harapan penulis, karya ini dapat memberikan manfaat dan menjadi kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang energi terbarukan berbasis biomassa.

Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis memperoleh banyak pelajaran berharga dan dukungan dari berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Su'udi, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.

4. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan waktu sehingga selesainya penulisan skripsi ini.
5. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II terima kasih atas bantuan dan saran yang telah diberikan sehingga selesainya penulisan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah berkenan memberikan koreksi dan arahan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing, mendampingi, dan memberikan arahan selama masa studi.
8. Seluruh Dosen, Staff dan Karyawan Teknik Mesin Universitas Lampung.
9. Terima kasih tak terhingga kepada kedua orang tua tercinta saya yakni Ibunda Yeni Hartati dan Ayahanda Hermansyah, yang dengan segala pengorbanan, kerja keras, dan kasih sayang tulusnya selalu mendukung saya dalam setiap langkah. Mereka tidak pernah lelah mengusahakan yang terbaik untuk saya. Doa, motivasi, dan dukungan mereka menjadi kekuatan terbesar hingga saya berhasil menyelesaikan skripsi ini dan meraih gelar Sarjana Teknik. Terima kasih sudah mengantarkan saya berada di tempat ini.
10. Aina Talita Zahran, seseorang yang darahnya juga ikut mengalir dalam tubuh saya, terima kasih yang tak terhingga untuk adik saya. Sosok yang selalu menjadi sumber motivasi dan semangat saya selama menjalankan proses perkuliahan.
11. Kepada seseorang yang tak kalah penting kehadirannya, Terima kasih telah menemani penulis selama masa perkuliahan hingga hari ini.
12. Untuk Ariq, Farid, Fernando, Habib, Nabhan, Nasrul, Sinwani, Wahyu, dan Zufar. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup saya. Berkontribusi banyak dalam penulisan karya tulis ini, baik tenaga maupun waktu kepada saya. Telah mendukung, menghibur, mendengarkan keluh kesah, dan memberikan semangat untuk pantang menyerah.

13. Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada tim seperjuangan saya, Komang Andre Wijaya, dan Rizki Ramadhan, atas segala bantuan dan dedikasi yang telah diberikan selama proses penyusunan Skripsi ini.
14. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2021 yang telah kebersamai, memberi motivasi dan semangat selama perkuliahan.
15. Serta seluruh pihak yang tak dapat saya sebutkan satu persatu yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu menyelesaikan Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kemajuan ilmu pengetahuan di masa mendatang dari semua pihak. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan pembaca.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Bandar Lampung, 10 Maret 2026

Penulis,

**Muhammad Fathan Nursalam**

## DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xviii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 Batasan Masalah</b> .....	<b>4</b>
<b>1.5 Sistematika Penulisan</b> .....	<b>4</b>
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Biomassa</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2 Torefaksi</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3 <i>Swietenia macrophylla</i></b> .....	<b>8</b>
<b>2.4 Karakteristik Bahan Bakar Padat</b> .....	<b>9</b>
2.4.1 Analisis <i>Proximate</i> .....	<b>9</b>
2.4.2 Analisis <i>Ultimate</i> .....	<b>11</b>
2.4.3 Nilai Kalor .....	<b>11</b>
<b>2.5 Parameter Proses Torefaksi</b> .....	<b>12</b>
2.5.1 Temperatur .....	<b>12</b>
2.5.2 Waktu Tinggal ( <i>Residence time</i> ) dan Laju Pemanasan .....	<b>13</b>
2.5.3 Ukuran Partikel .....	<b>13</b>
2.5.4 Kadar Air Awal Biomassa .....	<b>13</b>
<b>2.6 Klasifikasi Reaktor Torefaksi</b> .....	<b>14</b>
2.6.1 <i>Directly Heated Reactors</i> .....	<b>14</b>
2.6.2 <i>Indirectly Heated Reactors</i> .....	<b>15</b>
<b>2.7 Kualitas Produk Torefaksi</b> .....	<b>16</b>
2.7.1 <i>Mass yield</i> .....	<b>16</b>
2.7.2 <i>Energy yield</i> .....	<b>17</b>
2.7.3 <i>Energy density</i> .....	<b>17</b>

<b>2.8 Konversi Termal Biomassa</b> .....	18
2.8.1 <i>Combustion</i> .....	19
2.8.2 <i>Gasification</i> .....	19
2.8.3 <i>Pyrolysis</i> .....	20
2.8.4 <i>Torrefaction</i> .....	20
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Tempat dan Waktu Penelitian</b> .....	22
<b>3.2 Alat dan Bahan</b> .....	22
<b>3.3 Rancangan Penelitian</b> .....	26
<b>3.4 Prosedur Pengujian</b> .....	27
3.4.1 Prosedur Pengujian Torefaksi .....	27
3.4.2 Prosedur Pengujian <i>Calorific value</i> .....	28
3.4.3 Prosedur Pengujian <i>Hydrophobicity</i> .....	31
<b>3.5 Parameter Penelitian</b> .....	31
<b>3.6 Tahapan Penelitian</b> .....	32
<b>3.7 Diagram Alur Penelitian</b> .....	34
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>36</b>
<b>4.1 Perubahan Fisik Hasil Torefaksi</b> .....	36
<b>4.2 Nilai Kalor</b> .....	38
4.2.1 Nilai Kalor Kayu Mahoni Pada Temperatur Torefaksi 250°C .....	39
4.2.2 Nilai Kalor Kayu Mahoni Pada Temperatur Torefaksi 275°C.....	41
4.2.3 Nilai Kalor Kayu Mahoni Pada Temperatur Torefaksi 300°C.....	43
4.2.4 Perbandingan Nilai Kalor Pada Berbagai Variasi Pengujian .....	45
<b>4.3 Mass yield</b> .....	47
4.3.1 <i>Mass yield</i> Pada Temperatur 250°C .....	47
4.3.2 <i>Mass yield</i> Pada Temperatur 275°C.....	49
4.3.3 <i>Mass yield</i> Pada Temperatur 300°C.....	50
4.3.4 Perbandingan <i>Mass yield</i> Pada Tiap Variasi Pengujian .....	51
<b>4.4 Energy Yield</b> .....	53
4.4.1 <i>Energy yield</i> Pada Temperatur 250°C.....	53
4.4.2 <i>Energy yield</i> Pada Temperatur 275°C.....	55
4.4.3 <i>Energy yield</i> Pada Temperatur 300°C.....	57
4.4.4 Perbandingan <i>Energy yield</i> Pada Tiap Variasi Pengujian .....	58
<b>4.6 Hydrophobicity</b> .....	60
<b>4.7 Perubahan Komposisi Proksimat <i>Wood chip</i> Mahoni</b> .....	61
<b>V. PENUTUP</b> .....	<b>63</b>

<b>5.1 Kesimpulan .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2 Saran .....</b>	<b>64</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>66</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pohon Mahoni .....	9
Gambar 2. 2 Rentang Temperatur Dekomposisi Lignoselulosa Biomassa .....	12
Gambar 2. 3 Klasifikasi Proses Konversi Termal Biomassa Berdasarkan Temperatur dan Ketersediaan Oksigen .....	18
Gambar 3. 1 Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas Oil Jacket.....	22
Gambar 3. 2 Mahogany <i>Wood chip</i> .....	24
Gambar 3. 3 Temperature Memory Logger .....	25
Gambar 3. 4 Skema Pengujian Reaktor Torefaksi .....	25
Gambar 4. 1 Produk Hasil Torefaksi <i>Wood chip</i> Mahoni.....	36
Gambar 4. 2 Grafik Nilai Kalor pada Temperatur 250°C .....	39
Gambar 4. 3 Grafik Nilai Kalor pada Temperatur 275°C .....	41
Gambar 4. 4 Grafik Nilai Kalor Pada Temperatur 300°C.....	43
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Nilai Kalor Tiap Variasi Pengujian .....	45
Gambar 4. 6 Grafik <i>Mass yield</i> Pada Temperatur 250°C.....	48
Gambar 4. 7 Grafik <i>Mass yield</i> Pada Temperatur 275°C.....	49
Gambar 4. 8 Grafik <i>Mass yield</i> Pada Temperatur 300°C.....	50
Gambar 4. 9 Grafik <i>Mass yield</i> Pada Tiap Variasi Pengujian .....	52
Gambar 4. 10 Grafik <i>Energy yield</i> Pada Temperatur 250°C.....	54
Gambar 4. 11 Grafik <i>Energy yield</i> Pada Temperatur 275°C .....	55
Gambar 4. 12 Grafik <i>Energy yield</i> Pada Temperatur 300°C.....	57
Gambar 4. 13 Grafik <i>Energy yield</i> Pada Tiap Variasi Pengujian .....	58
Gambar 4. 14 Grafik Nilai Water Uptake Sampel .....	60
Gambar 4. 15 Grafik Hasil Analisis Proksimat <i>Wood chip</i> Mahoni.....	62

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular. ....	23
Tabel 3. 2 Komposisi Kimia Mahogany Wood chip (Mulhidin dkk.,2018).....	24
Tabel 3. 3 Rancangan Penelitian .....	27

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Peningkatan emisi karbon dioksida dalam beberapa dekade terakhir banyak disebabkan oleh tingginya penggunaan bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Ketergantungan terhadap sumber energi ini tidak hanya mempercepat laju perubahan iklim, tetapi juga mengakibatkan berbagai dampak lingkungan yang serius. Ketergantungan ini mendorong negara-negara, termasuk Indonesia, untuk mengeksplorasi dan mengembangkan sumber energi alternatif. Cadangan energi fosil yang terbatas mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Energi biomassa menjadi salah satu kandidat potensial sebagai sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan peran bahan bakar fosil, karena berasal dari sumber daya yang melimpah dan merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui. Biomassa memiliki potensi untuk menggantikan energi fosil berkat ketersediaannya yang melimpah dan kemampuannya dalam mereduksi emisi karbon.

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan-bahan organik seperti limbah pertanian, limbah perkebunan, limbah kayu, serta sisa hasil industri atau rumah tangga. Seiring dengan perkembangan teknologi, konversi biomassa kini dapat dilakukan melalui berbagai metode seperti pirolisis, gasifikasi, dan torefaksi, yang masing-masing memiliki keunggulan dalam meningkatkan efisiensi energi serta memperbaiki karakteristik bahan bakar yang dihasilkan, baik dari segi nilai kalor, kestabilan pembakaran, maupun sifat penyimpanan. Metode-metode ini memungkinkan biomassa diolah menjadi bentuk energi yang lebih bersih, mudah ditangani, dan sesuai untuk berbagai aplikasi energi, mulai dari pembangkit listrik skala kecil hingga bahan bakar alternatif di sektor industri. Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat besar dan beragam.

Torefaksi merupakan proses termokimia yang terjadi pada suhu 200 - 300°C dalam kondisi *anaerobik*, bertujuan untuk meningkatkan karakteristik bahan bakar biomassa. Torefaksi meningkatkan nilai kalor biomassa dengan mengurangi kandungan air dan meningkatkan persentase karbon padat. Proses ini juga menghilangkan sebagian komponen volatil, menghasilkan bahan bakar padat yang lebih bernilai, dengan nilai kalor yang lebih tinggi dan sifat hidrofobik yang lebih baik, sehingga lebih mudah untuk disimpan dan digiling (Suharyatun dkk., 2022). Perlakuan Torefaksi pada biomassa di suhu 200 - 300°C dapat menghasilkan bahan bakar padat setara batu bara Sub-bituminous (Amrul dkk., 2019).

Limbah kayu mahoni (*Swietenia macrophylla*) memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan menjadi bahan bakar biomassa. Secara teknis, kayu mahoni tanpa kulit memiliki kadar abu sangat rendah umumnya berkisar pada 1% pada basis kering sehingga risiko *slagging and fouling* pada pembakaran campuran lebih kecil dibanding banyak biomassa lain. mutu bahan bakarnya juga dapat ditingkatkan melalui proses torefaksi. Dari sisi ketersediaan, berdasarkan data resmi Badan Pusat Statistik Tahun 2023 menunjukkan produksi kayu bulat mahoni Indonesia mencapai 58.301 m<sup>3</sup>. Menjadi indikator bahwa rantai pasokan kayu mahoni tergolong aktif. Rasio limbah kayu berada pada kisaran 37 - 65% (Sudiryanto, 2020). Sehingga limbah potensial kayu mahoni dari volume tersebut diperkirakan mencapai 21.571-34.398 m<sup>3</sup>/tahun. Dengan mengasumsikan kerapatan kayu mahoni kering yaitu 650 kg/m<sup>3</sup>, volume limbah tersebut setara 14,02 - 22,36 kiloton per tahun (Arisandi dkk., 2021) Dengan mengasumsikan nilai kalor kayu siap pakai (*as-received*) sebesar 18 - 19 MJ/kg, maka massa limbah tersebut dapat menghasilkan energi sekitar 252 - 425 ribu GJ per tahun (Leoni dkk., 2021).

Melihat potensi limbah kayu mahoni serta hasil berbagai penelitian terdahulu pada biomassa kayu, penelitian ini dimaksudkan untuk meningkatkan kualitas kayu mahoni sebagai bahan bakar padat melalui perlakuan termal berupa torefaksi. Tumuluru dkk. (2021) melaporkan bahwa torefaksi pada kisaran 200 - 300°C dalam atmosfer inert dapat menurunkan kadar air dan komponen volatil serta meningkatkan kandungan energi dan sifat hidrofobik biomassa. Pada biomassa

kayu pinus, Hazra dkk. (2023) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan waktu tinggal torefaksi meningkatkan kandungan karbon dan nilai kalor, meskipun rendemen padatan dan rendemen energi cenderung menurun. Hasil yang sejalan juga dilaporkan oleh Sutapa dan Hidyatullah (2023) pada pelet kayu kaliandra, yaitu bahwa kenaikan temperatur dan durasi torefaksi meningkatkan nilai kalor serta menurunkan kadar air dan zat terbang. Selain itu, Singara veloo dkk. (2025) menunjukkan bahwa torefaksi ringan pada biomassa kayu dapat meningkatkan hidrofobisitas, ketahanan terhadap penyerapan air, serta stabilitas termal dan karakteristik pembakaran. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh temperatur dan waktu tinggal torefaksi terhadap sifat fisik dan kimia kayu mahoni, sehingga dapat dimanfaatkan secara lebih optimal sebagai sumber energi terbarukan yang efisien, ramah lingkungan, dan memiliki nilai ekonomis. Proses ini diharapkan mampu memperbaiki karakteristik bahan bakar kayu mahoni, baik dari segi nilai kalor, kestabilan saat pembakaran, maupun sifat fisiknya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh proses torefaksi terhadap sifat fisik dan kimia kayu mahoni melalui dua variasi perlakuan, yaitu suhu, dan waktu tinggal, sehingga dapat dimanfaatkan secara lebih optimal sebagai sumber energi terbarukan yang efisien, ramah lingkungan, dan memiliki nilai ekonomis.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dari penelitian torefaksi biomassa kayu mahoni ini adalah bagaimana variasi temperatur, dan variasi waktu tinggal mempengaruhi karakteristik bahan bakar padat hasil torefaksi biomassa *wood chip* mahoni, yang meliputi nilai kalor, *proximate analysis*, *mass yield*, dan *energy yield*.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan pengaruh variasi temperatur dan waktu tinggal terhadap *mass yield* dan *energy yield* pada proses torefaksi biomassa *wood chip* mahoni.
2. Menentukan pengaruh proses torefaksi dengan variasi temperatur dan waktu tinggal terhadap nilai kalor dari biomassa *wood chip* mahoni.
3. Mengkaji pengaruh dari kedua variabel proses tersebut terhadap perubahan komposisi proksimat (kadar air, zat terbang, abu, dan karbon terikat) dari produk padat yang dihasilkan.
4. Menentukan tingkat hidrofobisitas biomassa sebelum dan setelah proses torefaksi, untuk mengetahui tingkat ketahanan produk torefaksi terhadap penyerapan air.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Adapun Batasan masalah penulisan yang diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian menggunakan biomassa kayu mahoni berbentuk *wood chip*.
2. Reaktor yang digunakan adalah reaktor torefaksi kontinu tipe tubular sistem oil jacket dengan sumber pemanas LPG.
3. Variasi temperatur torefaksi dilakukan dengan 3 variasi temperatur yaitu sekitar 250, 275, dan 300°C.
4. *Residence time* yang digunakan dalam proses torefaksi selama 10, 20, dan 30 menit.

#### **1.5 Sistematika Penulisan**

##### **BAB I. PENDAHULUAN**

Bab ini menguraikan konteks yang melandasi penelitian, termasuk latar belakang, tujuan penelitian, dan batasan masalah untuk memastikan pembahasan tetap fokus. Selain itu, dijelaskan pula kerangka penulisan yang menjadi format laporan ini.

##### **BAB II. LANDASAN TEORI**

Bagian ini menyajikan berbagai teori relevan yang menjadi dasar dan acuan dalam penelitian. Cakupan teori meliputi konsep-konsep mendasar seperti definisi biomassa, proses torefaksi, dan parameter karakteristik bahan bakar padat, serta penjelasan mengenai reaktor.

### **BAB III. METODE PENELITIAN**

Bab ini merinci aspek teknis pelaksanaan penelitian, yang mencakup informasi mengenai waktu dan lokasi, peralatan dan material yang digunakan, serta diagram alir tahapan penelitian secara sistematis.

### **BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bagian ini memaparkan seluruh data yang diperoleh dari hasil pengujian. Selanjutnya, data tersebut akan dianalisis dan dibahas secara mendalam untuk menghasilkan interpretasi yang komprehensif.

### **BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab terakhir ini berisi rangkuman akhir atau kesimpulan yang ditarik dari hasil analisis penelitian. Selain itu, disampaikan pula beberapa saran untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.

### **DAFTAR PUSTAKA**

Berisi daftar seluruh sumber referensi dan literatur yang dikutip dan digunakan dalam penyusunan laporan penelitian.

### **LAMPIRAN**

Memuat dokumen-dokumen pendukung, seperti data mentah, hasil perhitungan, atau gambar-gambar yang melengkapi isi laporan.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Biomassa

Biomassa merupakan bahan organik yang berasal dari tanaman, hewan, dan mikroorganisme, yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan karena kemampuannya untuk diperbarui dalam siklus waktu yang relatif singkat. Biomassa terutama mengacu pada bahan-bahan nabati seperti kayu, limbah pertanian, dan sisa-sisa tanaman industri, yang merupakan hasil dari proses fotosintesis dan mengandung energi kimia yang tersimpan (Pramudiyanto & Suedy, 2020). Sebagai bahan bakar, biomassa memiliki keunikan karena komposisinya yang bervariasi, namun secara umum terdiri dari tiga komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa merupakan polimer linier dari glukosa yang berfungsi sebagai kerangka struktural utama dalam dinding sel tanaman. Hemiselulosa, yang bersifat lebih mudah terdegradasi secara termal, merupakan polimer bercabang dari berbagai gula sederhana. Sementara lignin adalah senyawa aromatik kompleks yang memberikan kekakuan, ketahanan terhadap serangan mikroba, dan stabilitas termal pada jaringan tanaman (Annisa, 2022).

Biomassa lignoselulosa (kayu) pada dasarnya tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Untuk kelompok kayu daun lebar, rentang komposisi yang sering dilaporkan adalah selulosa 34 - 49%, hemiselulosa 13 - 31%, dan lignin 21 - 32% (ekstraktif beberapa persen). Paket komponen ini menentukan jalur reaksi saat dipanaskan, dehidrasi, devolatilisasi, hingga pemutusan ikatan aromatic sehingga sangat memengaruhi perilaku selama torefaksi serta pergeseran rasio O/C dan H/C. (Najjoun dkk., 2025). Komposisi fisik dan kimia biomassa sangat menentukan efisiensi penggunaannya sebagai sumber energi. Kadar air, kandungan zat volatil, karbon tetap, kandungan abu, dan nilai kalor merupakan beberapa parameter kunci yang berpengaruh. Biomassa dengan kadar air rendah dan karbon tetap tinggi dapat

menghasilkan proses pembakaran yang lebih efisien dan nilai energi yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan potensi penggunaannya dalam pembangkit energi (Barmina dkk., 2012). Dalam konteks neutralitas karbon, pembakaran biomassa sering kali dianggap netral, karena CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dapat diserap kembali oleh tanaman melalui fotosintesis, menjadikan biomassa sebagai alternatif yang ramah lingkungan dalam pemenuhan kebutuhan energi (Husika dkk., 2022). Namun demikian, tantangan utama yang dihadapi dalam pemanfaatan biomassa meliputi rendahnya densitas energi, tingginya kadar air dan abu pada beberapa jenis bahan, serta kebutuhan akan proses yang mengoptimalkan konversi biomassa menjadi energi yang lebih bermanfaat, pemanfaatannya sebagai sumber energi terbarukan dapat ditingkatkan melalui perlakuan torefaksi, berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan. Dengan demikian, pemanfaatan biomassa tidak hanya berperan penting dalam diversifikasi sumber energi, tetapi juga dapat berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (Husika dkk., 2022). Dengan penelitian dan pengembangan yang berkelanjutan, biomassa dapat semakin dioptimalkan untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan secara berkelanjutan dan ramah lingkungan.

## 2.2 Torefaksi

Torefaksi adalah *pre-treatment* termokimia pada biomassa dengan pemanasan lambat di atmosfer inert atau miskin oksigen hingga sekitar 200-300 °C untuk menurunkan rasio O/C dan H/C, meningkatkan hidrofobisitas serta kerapuhan (*grindability*), dan menaikkan nilai kalor, efek-efek ini muncul karena pelepasan air dan sebagian volatil ringan selama tahap pemanasan terkendali (Tumuluru dkk., 2021). Dalam praktik, rentang operasi torefaksi kerap dikelompokkan menjadi mild (200-240 °C), moderate (240-280 °C), dan *severe* (280-320 °C). Kenaikan tingkat keparahan umumnya menurunkan *mass yield* namun menaikkan densitas energi padatan, sehingga pemilihan suhu dan waktu tinggal biasanya mencari titik kompromi antara efisiensi energi dan target mutu bahan bakar padat (Chen dkk., 2021). Secara mekanistik, hemiselulosa merupakan fraksi paling reaktif pada

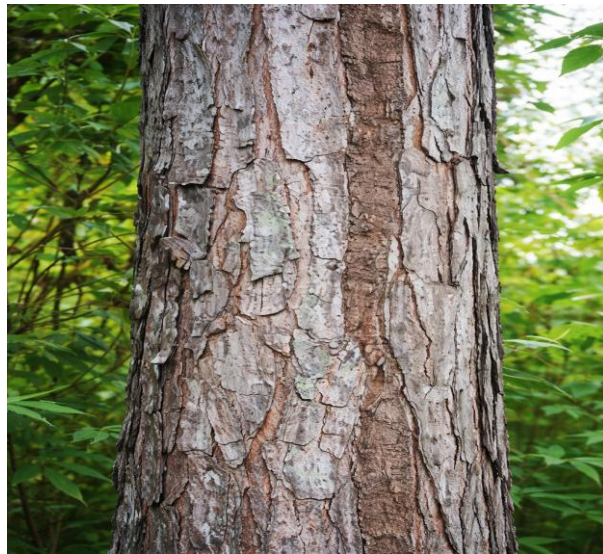
rentang torefaksi, terjadi deasetilasi dan depolimerisasi yang melepas asam asetat serta gas CO<sub>2</sub>/CO, selulosa mulai terpengaruh kuat mendekati batas atas suhu, sedangkan lignin lebih resisten dan berkontribusi pada kenaikan fraksi karbon tetap. Pergeseran gugus fungsional inilah yang mendorong penurunan H/C dan O/C padatan hasil (Barontini dkk., 2021).

Kinerja proses terutama ditentukan oleh suhu, waktu tinggal, dan ukuran partikel. Menaikkan suhu atau memperpanjang waktu tinggal memperdalam konversi (massa padatan turun, HHV naik) hingga titik diminishing returns. Sementara itu, partikel yang lebih kecil cenderung mencapai pemanasan inti lebih cepat sehingga konversi lebih tuntas namun yield massa sedikit lebih rendah, karena itu, penyaringan ukuran yang konsisten dianjurkan agar variasi output ditautkan pada parameter proses, bukan heterogenitas geometri (Ivanovski dkk., 2023). Perubahan unsur divisualisasikan pada diagram van Krevelen (H/C vs O/C) untuk menilai derajat deoksigenasi dan dehidrasi padatan pasca proses sebagai indikator *upgrading* (Ong dkk., 2021). Secara sifat, padatan yang diberi perlakuan torefaksi menunjukkan *volatile matter* lebih rendah, *fixed carbon* lebih tinggi, HHV meningkat, serta hidrofobisitas dan *grindability* yang membaik, implikasinya positif bagi penyimpanan terbuka, peletisasi briket, *co-firing*, dan *co-gasifikasi* pada sistem pembangkit (Waheed dkk., 2022).

### 2.3 *Swietenia macrophylla*

*Swietenia macrophylla* (mahoni) merupakan salah satu jenis kayu tropis dari famili *Meliaceae* yang memiliki nilai ekonomis tinggi sekaligus biomassa yang berpotensi besar dalam pengembangan energi terbarukan. Mahoni dikenal sebagai kayu keras tropis dengan batang lurus, cincin tumbuh yang jelas, serta warna coklat kemerahan yang semakin gelap seiring pertambahan usia. Di Indonesia, kayu ini telah lama dimanfaatkan untuk konstruksi, pembuatan furnitur, veneer, dan material dekoratif. Kerapatan kayu mahoni berada di kisaran angka 0,56–0,72 g/cm, kerapatan yang cukup tinggi ini membuat mahoni punya energi per volume yang lebih besar dibandingkan kayu ringan (Arisandi dkk., 2021)

Dari sisi komposisi kimia, beberapa penelitian telah mengungkapkan karakteristik penting kayu mahoni dan turunannya (Chukwuneke dkk., 2019) melaporkan bahwa *ultimate analysis* dari sampel kayu mahoni *Swietenia macrophylla* menunjukkan komposisi unsur sebesar karbon 55,3 %, hidrogen 4,56 %, oksigen 39,26 %, nitrogen < 0,4 % sulfur < 0,6 %, dan nilai HHV mencapai 21,26 MJ/kg. Kelebihan lainnya dari kayu mahoni adalah pada kadar abu yang rendah yaitu berada di angka 1,24% sehingga resiko dari *slagging* dan *fouling* rendah serta emisi partikulat yang dihasilkan lebih sedikit.



Gambar 2. 1 Pohon Mahoni  
(Krisnawati dkk., 2011)

## 2.4 Karakteristik Bahan Bakar Padat

Karakteristik bahan bakar padat memiliki beberapa parameter sebagai acuan berdasarkan karakteristik penyusun batubara. Untuk mencari komponen komponen penyusun batubara dapat melakukan dua analisis yaitu analisis *proximate* dan analisis *ultimate*.

### 2.4.1 Analisis *Proximate*

Analisis *proximate* dilakukan untuk menentukan moisture, *volatile matter*, *ash*, dan *fixed carbon* dihitung sebagai selisih dari 100% pada basis tertetu

standar praktik yang banyak digunakan di instrumen makro-TGA dirangkum dalam ASTM D7582-24.

a. *Moisture content* (kadar air).

Kadar air adalah fraksi air total dalam sampel sebagaimana diterima (*as-received*) dan pada metode acuan biofuel padat diukur dengan pengeringan oven hingga massa konstan. Secara praktis, air di biomassa hadir sebagai air bebas di pori/permukaan, air inherent yang terjebak dalam jaringan dinding sel, dan air terikat (hidrogenasi/kapiler) yang lebih sulit diusir; kombinasi ini memengaruhi nilai kalor bersih (NCV), stabilitas simpan (risiko jamur/biodegradasi), serta ongkos logistik karena massa angkut bertambah (ISO 18134-1:2022).

b. *Volatile matter* (zat terbang).

Zat terbang adalah fraksi massa yang menguap/terurai dari padatan saat dipanaskan secara terkontrol tanpa udara pada kondisi standar; besaran ini menggambarkan kecenderungan devolatilisasi, yang berpengaruh pada kemudahan penyalaan (*ignitability*), dinamika nyala, dan pembentukan tar/gas pada konversi termal. Dalam uji *proximate* instrumental (macro-TGA), VM ditentukan sebagai kehilangan massa terukur pada tahap pemanasan spesifik, terpisah dari kehilangan karena air, sehingga dapat dipakai untuk mengevaluasi perilaku pembakaran/pemanasan awal. (ASTM D7582-24).

c. *Ash* (abu).

Abu adalah residu anorganik tak terbakar yang tertinggal setelah pembakaran/pemijaran lengkap pada prosedur pengabuan terstandar. Nilainya merefleksikan kandungan mineral (silika, alkali, Fe, fosfat) yang memengaruhi *slagging/fouling*, korosi, dan pengelolaan limbah (*fly bottom ash*) (ISO 18122:2022).

d. *Fixed carbon*

*Fixed carbon* merepresentasikan fraksi arang padat mudah bakar yang tersisa setelah moisture dan *volatile matter* dikeluarkan; dalam laporan *proximate*, FC dihitung secara selisih dari 100% pada basis yang sama setelah moisture, VM, dan *ash* ditentukan. Besaran ini berkaitan dengan

pembakaran char (fase nyala lambat), kontribusi HHV, serta durasi tinggal bahan di grate/bed (ASTM D7582-24).

#### 2.4.2 Analisis *Ultimate*

Analisis *ultimate* dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur utama C, H, N (melalui pembakaran lengkap di elemental analyzer dan deteksi gas hasil oksidasi), sementara O umumnya dihitung berdasarkan perbandingan setelah komponen lain dan abu diketahui. Hasil dilaporkan sebagai persentasi massa pada basis yang dinyatakan (umumnya *dry base* untuk perbandingan antar sampel), dengan pengendalian mutu melalui kalibrasi standar, pengujian blank, replikasi, serta verifikasi *repeatability reproducibility* agar data dapat dipakai dalam perhitungan lanjutan. Diagram van Krevelen berfungsi sebagai peta kimia untuk menerjemahkan hasil analisis ultimate (C–H–O) menjadi indikator mutu bahan bakar padat. Dengan memplot rasio atomik H/C pada sumbu vertikal dan O/C pada sumbu horizontal (basis kering).

#### 2.4.3 Nilai Kalor

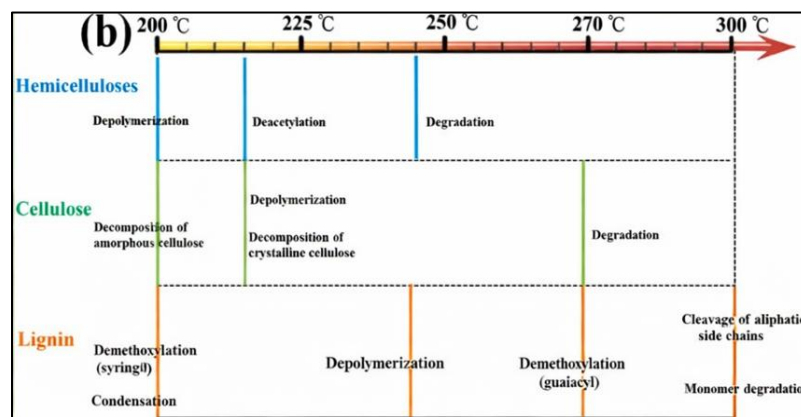
Nilai kalor menggambarkan energi yang dilepas saat pembakaran sempurna dan dilaporkan sebagai HHV (*gross calorific value*) serta LHV (*net calorific value*). HHV menghitung panas kondensasi uap air hasil pembakaran, sedangkan LHV mengurangi panas penguapan air sehingga lebih merepresentasikan energi yang benar-benar berguna pada sistem *non-condensing*. Di laboratorium/QA-QC, *bomb calorimetry* lazim digunakan sebagai metode acuan untuk menentukan HHV pada bahan bakar padat, lalu LHV dihitung dari HHV dengan mengurangi kontribusi air yang berasal dari kelembapan bahan dan air reaksi hidrogen karena itu, pelaporan basis (*as-received/dry/DAF*) dan kadar H sangat menentukan hasil konversi. Secara kimia, kandungan C yang lebih tinggi serta rasio O/C dan H/C yang lebih rendah (terlihat pada Diagram van Krevelen) umumnya berkorelasi dengan HHV yang meningkat, selaras dengan temuan *proximate* bahwa *volatile matter* cenderung turun dan *fixed carbon* naik setelah perlakuan torefaksi (Mutlu dkk., 2022).

## 2.5 Parameter Proses Torefaksi

Dalam torefaksi terdapat intensitas proses (*severity*) yaitu, seberapa keras perlakuan termal yang diterima biomassa. Intensitas ini terutama diatur oleh temperatur, waktu tinggal (*residence time*), dan laju pemanasan di atmosfer inert atau miskin oksigen. Semakin intens, reaksi dehidrasi dan deoksigenasi berjalan lebih jauh: material menjadi lebih hidrofobik dan mudah digiling (*grindability*), rasio O/C–H/C menurun, dan nilai kalor cenderung naik di sisi lain *mass yield* menurun (Khairy dkk., 2024).

### 2.5.1 Temperatur

Temperatur adalah ukuran seberapa panas reaktor, dan menjadi tuas intensitas yang paling dominan. Ketika suhu dinaikkan dalam rentang kerja torrefaksi pada suhu 200–300 °C, hemiselulosa mulai terdegradasi, gugus beroksigen terlepas (air, CO), dan struktur padatan berangsur “terkarbonisasi ringan”. Dampaknya terlihat jelas: rasio O/C turun, padatan makin hidrofobik dan rapuh (*grindable*), sementara HHV cenderung meningkat. Namun, Kenaikan suhu umumnya menurunkan *mass yield* oleh karena itu, suhu operasi ditetapkan pada titik kompromi, yakni mutu energi meningkat sementara kehilangan massa tetap dalam batas yang dapat diterima (Chen dkk., 2021). Rentang temperatur dekomposisi komponen utama biomassa lignoselulosa selama proses torefaksi, yaitu hemiselulosa, selulosa, dan lignin, pada temperatur 200 - 300 °C, dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Rentang Temperatur Dekomposisi Lignoselulosa Biomassa

(Zhang dkk., 2025)

### 2.5.2 Waktu Tinggal (*Residence time*) dan Laju Pemanasan

Waktu tinggal adalah lamanya partikel berada di zona pemanasan. Pada suhu konstan, memperpanjang waktu tinggal akan memperdalam konversi *mass yield* terus turun, sementara HHV dan kemudahan giling membaik. Akan tetapi, setelah fraksi paling reaktif habis, tambahan waktu hanya memberi keuntungan kecil (titik *diminishing returns*), sehingga rentang puluhan menit (30 - 90 menit) sering dipilih untuk menjaga efisiensi (Ajikashile dkk., 2023). Laju pemanasan adalah kecepatan kenaikan suhu. Torefaksi umumnya menggunakan *heating rate* moderat agar reaksi terkendali dan produk seragam. Menaikkan heating rate cenderung memajukan pelepasan volatil (puncak devolatilisasi terjadi lebih awal) dan sedikit mengubah distribusi produk; meski demikian, temperatur proses biasanya tetap menjadi penentu terbesar besarnya kehilangan massa atau energi (Yadav & Singh, 2023).

### 2.5.3 Ukuran Partikel

Ukuran partikel mempengaruhi laju pemanasan internal dan keseragaman konversi. Partikel kecil lebih cepat panas hingga ke inti dan cenderung menghasilkan konversi yang merata tetapi sering didapati dengan solid atau *energy yield* sedikit lebih rendah karena reaksi lebih tuntas. Partikel besar berisiko menyisakan inti kurang terproses, sehingga memerlukan waktu lebih lama atau suhu sedikit lebih tinggi untuk mutu yang sama (He dkk., 2023).

### 2.5.4 Kadar Air Awal Biomassa

Kadar air awal biomassa merupakan salah satu kondisi awal bahan yang penting dalam proses torefaksi karena memengaruhi kebutuhan energi pada tahap pemanasan awal dan berpengaruh terhadap efektivitas peningkatan mutu biomassa. Biomassa mentah umumnya memiliki kelemahan berupa kadar air yang masih tinggi dan sifat higroskopis, sehingga kurang menguntungkan untuk penyimpanan, penanganan, dan pemanfaatan langsung sebagai bahan bakar padat. Melalui proses torefaksi, biomassa dapat diubah menjadi bahan bakar padat yang lebih hidrofobik, lebih stabil, dan memiliki kualitas energi yang lebih baik. Proses torefaksi dapat menghasilkan biomassa yang lebih hidrofobik, lebih padat energi, dan mengalami

perubahan struktur fisik, sehingga pengendalian kadar air awal menjadi penting agar pengaruh temperatur dan waktu tinggal terhadap karakteristik hasil torefaksi dapat diamati secara lebih akurat. Oleh karena itu, dalam penelitian ini kadar air awal chip kayu mahoni diperlakukan sebagai variabel kontrol yang dijaga seragam pada setiap perlakuan (Zhang dkk., 2025).

## 2.6 Klasifikasi Reaktor Torefaksi

Reaktor Torefaksi dikelompokkan berdasarkan mode pemanasannya berdasarkan (Basu, 2013) yaitu:

### 2.6.1 *Directly Heated Reactors*

Pada reaktor yang dipanaskan langsung, biomassa bersentuhan langsung dengan media pembawa panas. Perpindahan panas terutama terjadi melalui konveksi gas padatan, tetapi dapat pula melalui padatan panas atau cairan panas contohnya pada air bertekanan, uap lewat panas, atau minyak limbah. Selama media tersebut berfungsi sebagai pembawa panas yang bersentuhan langsung dengan partikel biomassa.

#### a. *Convective Reactor*

Pada tipe konvektif, gas panas (umumnya inert, kadang mengandung O<sub>2</sub> terbatas) mengalir melewati/menembus bed biomassa, sehingga panas berpindah terutama lewat konveksi gas padatan. Jika partikel diam relatif terhadap dinding reaktor, disebut fixed bed; bila partikel bergerak (oleh gravitasi, vibrating belt, atau rotating disk) disebut moving bed. Varian entrained flow membawa serbuk halus dalam aliran gas berkecepatan tinggi, sehingga pemanasan sangat cepat dan waktu tinggal dapat dipersingkat dengan konsekuensi yield padatan menurun dan fraksi cair meningkat karena laju devolatilisasi tinggi.

#### b. *Fluidized Bed*

Pada tipe ini, gas inert ditiup dari bawah hingga membubbling bed partikel pembawa panas misalnya pasir atau partikel biomassa berukuran sesuai, sehingga bed bersifat seperti fluida. Pencampuran sangat intens

dan sebaran suhu merata, membuat kualitas produk lebih seragam dibanding fixed/moving bed. Tantangannya adalah pemisahan partikel pembawa panas dan potensi terbawa-terbang (entrainment) partikel halus. Varian torbed memanfaatkan kisi miring dengan cross-flow gas untuk waktu tinggal sangat singkat.

c. *Hydrothermal Reactor*

Reaktor hidrotermal menjalankan torefaksi dalam air bertekanan (subkritis), sehingga pengeringan awal tidak diperlukan dan cocok untuk umpan berkadar air tinggi; selain menurunkan O/C, proses ini dapat sedikit meningkatkan hidrofobisitas padatan. Mekanisme pemanasan didominasi perpindahan panas air padatan.

### 2.6.2 *Indirectly Heated Reactors*

Pada reaktor yang dipanaskan tidak langsung, media pemanas tidak bersentuhan dengan biomassa. Panas dialirkan melalui dinding reaktor (konduksi) atau diberikan sebagai radiasi gelombang mikro. Keunggulan utamanya, kontak dengan oksigen (O<sub>2</sub>) lebih mudah dihindari dan gas hasil torefaksi (torr-gas) tidak terdilusi oleh media pemanas, sehingga dapat dibakar terpisah untuk membantu memasok kebutuhan panas reaktor. Konsekuensinya, karena panas masuk dari permukaan menuju inti partikel, sering timbul perbedaan suhu di dalam bahan (pemanasan kurang seragam).

a. *Rotating Drum*

Drum berputar bertindak sebagai alat pencampur; biomassa dituang dan ditumbuk (*tumbling*) di dalamnya sementara dinding/drum dipanaskan dari luar, sehingga panas masuk lewat konduksi dinding partikel. Gas panas dapat dipakai *sweep gas* untuk membawa uap/volatil keluar, tetapi tanpa kontak panas langsung sebagai sumber utama.

b. *Screw or Stationary Shaft*

Pada *screw/auger*, padatan dikendalikan oleh sekrup melewati tabung/dinding yang dipanaskan; laju sekrup mengatur waktu tinggal dan keteraturan alir, sedangkan konduksi dari dinding menjadi jalur utama perpindahan panas. Konsep *stationary heated shaft* bekerja serupa permukaan panas internal memanaskan padatan saat dilintasi. Keduanya

cocok untuk operasi semi-kontinu atau kontinu dan integrasi pemulihan panas.

c. *Microwave*

Pada *microwave torrefaction*, gelombang mikro memanaskan molekul air atau komponen polar secara volumetrik, sehingga pemanasan lebih merata dari dalam dan dapat mempercepat tercapainya suhu target, aliran padatan dijaga *plug flow* untuk memperoleh profil waktu tinggal yang rapi. Tantangan utamanya adalah distribusi medan dan kontrol skala.

## 2.7 Kualitas Produk Torefaksi

Kualitas bahan bakar padat hasil torefaksi umumnya dinilai dengan tiga besaran utama: *mass yield*, *energy density*, dan *energy yield*. Ketiganya saling terkait *mass yield* merepresentasikan berapa banyak padatan yang masih tersisa, *energy density* menunjukkan mutu energi per satuan massa (atau volume), sedangkan *energy yield* menggambarkan porsi energi awal yang masih dipertahankan setelah proses.

### 2.7.1 *Mass yield*

*Mass yield* adalah ukuran fraksi massa biomassa awal yang masih tersisa sebagai produk padat setelah torefaksi. Karena air hasil pengeringan dan abu tidak menyumbang energi kimia, Penyajian yang paling akurat adalah menggunakan basis *dry ash-free* (daf) karena komponen air dan abu diabaikan, dengan demikian, nilai *mass yield* benar-benar merepresentasikan residu organik yang dapat terbakar (Basu, 2013). Untuk keperluan neraca panas/masa, besaran ini juga sering disajikan pada *dry* basis (db) atau *as-received* (ar) ketika kandungan air dan abu perlu dihitung secara eksplisit.

$$MY_{daf} = \frac{m_{tdaf}}{m_{0daf}} \dots \dots \dots (1)$$

$$MY_{db} = \frac{m_{tdb}}{m_{0db}} \dots \dots \dots (2)$$

$$MY_{ar} = \frac{m_{tar}}{m_{0ar}} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

$MY_{daf}$ : Mass yield “dry ash free”

$MY_{db}$  : Mass yield “dry based”

$MY_{ar}$  : Mass yield “as-received”

$m_{tdaf}$  : Massa total biomassa tertorefaksi “dry ash free”

$m_{tdb}$  : Massa total biomassa tertorefaksi “dry based”

$m_{tar}$  : Massa total biomassa tertorefaksi “as-received”

$m_{0daf}$  : Massa total sampel biomassa tanpa air dan tanpa abu

$m_{0db}$  : Massa total sampel biomassa kering

$m_{0ar}$  : Massa total sampel biomassa pada kondisi awal, termasuk kadar air dan abu.

### 2.7.2 Energy yield

*Energy yield* (EY) menyatakan fraksi energi awal yang masih tertahan pada padatan setelah torefaksi. atau rasio perbandingan total energi produk dengan total energi awal sebelum torefaksi (energi umpan). Secara umum didefinisikan sebagai perbandingan energi pada produk terhadap energi pada umpan pada basis yang sama.

$$EY = \frac{m_t HHV_t}{m_0 HHV_0}$$

Dimana:

$EY$  : *Energy yield*

$m_t$  : Massa padatan produk setelah torefaksi

$m_0$  : Massa umpan awal biomassa sebelum torefaksi

$HHV_t$ : *Higher Heating Value* (HHV) produk torefaksi

$HHV_0$ : *Higher Heating Value* (HHV) biomassa mentah

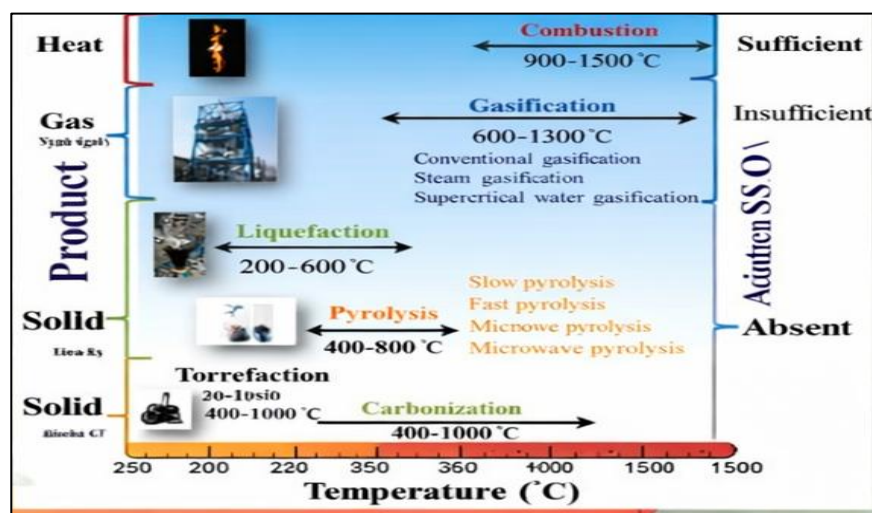
### 2.7.3 Energy density

*Energy density* pada bahan bakar padat umumnya dinyatakan sebagai nilai kalor per satuan massa, terutama HHV (kJ/kg), adalah ukuran seberapa kaya energi setiap kilogram padatan hasil torefaksi. dapat pula digunakan kepadatan energi volumetrik, yang secara praktis dihitung dengan mempertimbangkan HHV dan kerapatan curah (*bulk density*). Setelah proses

torefaksi, terdapat massa yang hilang terutama kadar *volatile* serta gas ringan ber kandungan oksigen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , uap ringan), energi per kilogram tetap meningkat (HHV naik) meskipun energi total pada padatan menurun akibat turunnya *mass yield*.

## 2.8 Konversi Termal Biomassa

Konversi termal biomassa merupakan proses pengubahan biomassa menjadi energi atau produk bernilai guna melalui pemanfaatan panas. Proses ini menjadi salah satu pendekatan penting dalam pemanfaatan biomassa karena mampu mengubah bahan organik menjadi produk padat, cair, gas, maupun panas, tergantung pada kondisi operasi yang digunakan. Beberapa jalur utama dalam konversi termal biomassa meliputi *combustion*, *gasification*, *pyrolysis*, *torrefaction*, dan *carbonization*.



Gambar 2. 3 Klasifikasi Proses Konversi Termal Biomassa Berdasarkan Temperatur dan Ketersediaan Oksigen

(Zhang dkk., 2025)

Perbedaan utama antarproses tersebut terletak pada temperatur operasi, laju pemanasan, waktu tinggal, serta ketersediaan oksigen selama proses berlangsung. Secara umum, *combustion* dilakukan dengan suplai oksigen yang cukup untuk menghasilkan panas, *gasification* berlangsung dengan oksigen terbatas untuk menghasilkan gas sintesis, *pyrolysis* berlangsung tanpa oksigen untuk menghasilkan *bio-oil*, *gas*, dan *char*, *torrefaction* merupakan pemanasan ringan untuk

meningkatkan mutu bahan bakar padat, sedangkan *carbonization* merupakan proses pengayaan karbon pada temperatur yang lebih tinggi untuk menghasilkan arang atau padatan kaya karbon. Dengan demikian, pemilihan jenis konversi termal sangat dipengaruhi oleh tujuan akhir pemanfaatan biomassa dan karakteristik produk yang diinginkan. Klasifikasi proses termal biomassa dapat dilihat pada Gambar 2.3.

### 2.8.1 *Combustion*

*Combustion* atau pembakaran merupakan proses konversi termal biomassa dengan suplai oksigen yang cukup, sehingga biomassa bereaksi sempurna atau mendekati sempurna dengan oksigen untuk menghasilkan panas sebagai produk utama. Proses ini umumnya digunakan pada sistem pembangkit energi termal, seperti boiler dan tungku pembakaran, karena paling sederhana dan paling luas penerapannya. Pada pembakaran biomassa, kandungan karbon, hidrogen, dan sebagian sulfur dioksidasi menjadi gas hasil pembakaran, sedangkan energi kimia yang tersimpan di dalam biomassa dilepaskan dalam bentuk panas. Dibandingkan jalur termokimia lain, *combustion* tidak diarahkan untuk mempertahankan struktur padat biomassa, melainkan untuk memaksimalkan pelepasan energi termal. Oleh sebab itu, *combustion* lebih sesuai untuk kebutuhan energi langsung, tetapi kurang tepat bila tujuan utamanya adalah menghasilkan bahan bakar padat hasil *upgrading*.

### 2.8.2 *Gasification*

Gasifikasi merupakan proses konversi termal biomassa pada temperatur tinggi dengan suplai oksigen terbatas atau menggunakan agen gasifikasi tertentu, seperti udara, uap, atau campuran keduanya. Produk utama dari proses ini adalah gas sintetis (*syngas*) yang umumnya tersusun atas karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), dan sejumlah kecil hidrokarbon ringan lainnya. Dibandingkan pembakaran, gasifikasi tidak bertujuan menghasilkan panas secara langsung, melainkan mengubah biomassa menjadi bahan bakar gas yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut untuk pembangkit listrik, pembakaran sekunder, atau sintesis bahan kimia. Proses ini biasanya berlangsung pada rentang temperatur yang lebih

tinggi daripada torefaksi dan pirolisis, sehingga dekomposisi biomassa berlangsung lebih lanjut dan produk padat yang tersisa menjadi lebih sedikit.

### 2.8.3 *Pyrolysis*

Pirolisis adalah proses dekomposisi termal biomassa pada kondisi tanpa oksigen atau dengan oksigen yang sangat minim. Dalam proses ini, biomassa dipanaskan sehingga komponen penyusunnya terurai menjadi tiga fraksi utama, yaitu produk cair (*bio-oil*), gas, dan padatan (*biochar*). Distribusi ketiga produk tersebut sangat dipengaruhi oleh temperatur, laju pemanasan, ukuran partikel, dan waktu tinggal. Pirolisis dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, seperti *slow pyrolysis* dan *fast pyrolysis*, yang masing-masing menghasilkan proporsi produk yang berbeda. *Slow pyrolysis* cenderung menghasilkan biochar lebih banyak, sedangkan *fast pyrolysis* lebih diarahkan untuk memperoleh *bio-oil*. Karena berlangsung pada temperatur lebih tinggi daripada torefaksi, *pyrolysis* menyebabkan dekomposisi biomassa yang lebih intensif dan menghasilkan perubahan kimia serta fisik yang lebih besar pada bahan.

### 2.8.4 *Torrefaction*

Torefaksi merupakan proses konversi termal ringan biomassa pada kisaran temperatur sekitar 200 - 300 °C dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan oksigen sangat rendah. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat melalui pengurangan kadar air, penurunan kadar *volatile matter*, peningkatan persentase *fixed carbon*, serta kenaikan densitas energi. Dibandingkan dengan pirolisis, torefaksi berlangsung pada temperatur yang lebih rendah dan masih mempertahankan sebagian besar kandungan padatan biomassa, sehingga produk utamanya adalah bahan bakar padat biomassa yang lebih bernilai dengan karakteristik yang lebih baik. Proses ini juga menyebabkan biomassa menjadi lebih hidrofobik, lebih rapuh, dan lebih mudah digerus, sehingga lebih sesuai untuk penyimpanan, transportasi, dan pemanfaatan lanjutan sebagai bahan bakar padat. Oleh karena itu, torefaksi sering dipandang sebagai tahap *pre-treatment* termal untuk meningkatkan mutu biomassa sebelum digunakan

lebih lanjut, baik untuk pembakaran, gasifikasi, maupun aplikasi energi lainnya.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 – Januari 2026 di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin , Fakultas Teknik Universitas Lampung dan Hanggar Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, serta bekerjasama dengan Laboratorium Energi Baru dan Terbarukan Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

#### 3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini terdapat alat utama dan alat pendukung seperti pada gambar 3.1 berikut.

1. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Sistem Pemanas *Oil Jacket*.



Gambar 3. 1 Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas Oil Jacket

Alat utama yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain: reaktor torefaksi tipe tubular, Reaktor kontinu tipe tubular dengan pemanas *oil jacket* merupakan reaktor berbentuk tabung yang dioperasikan secara kontinu, di mana perpindahan panas ke bahan dilakukan melalui media oli yang mengelilingi dinding reaktor. Dapat dilihat pada Gambar 3.1, pemantik api, gas LPG 12 kg, regulator LPG, *thermocouple* tipe K, 12 *Channel Temperature Memory Logger*. Sedangkan alat pendukung yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain: timbangan digital, laptop, *stopwatch*, kamera, plastik kedap udara, baterai dan kabel listrik. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket* memiliki spesifikasi lengkap seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular.

<b>• Reaktor</b>	
Diameter Screw	: 195 mm
Diameter Tabung Luar	: 203,1 mm
Diameter Tabung Dalam	: 254,0 mm
Panjang Reaktor	: 1600 mm
Tinggi Reaktor	: 1700 mm
Jarak Pitch	: 100 mm
Diameter Poros	: 50 mm
Kecepatan Putar	: 0,5 rpm
Kapasitas Maksimum	: 5 kg/jam
<b>• Sistem Penggerak</b>	
<i>Electromotor</i>	: 1 unit @ 0,5 Hp
<i>Ratio Gear Reducer</i>	: 2 unit @ 1: 60
<b>• Medium Pemanas</b>	
Jenis Medium Pemanas	: <i>Heat transfer oil caflo</i> <sup>TM</sup> AF
Merek Medium Pemanas	: Petro Canada
Temperatur Maksimum	: 375 °C
Tekanan Kerja	: 1 atm
<b>• Sistem Pembakaran</b>	
Ruang Bakar	: <i>Horizontal Burner</i>
Bahan Bakar	: <i>Liquefied Petrileum Gas (LPG)</i>
<b>• Sistem Kontrol Temperatur</b>	
Sensor Temperatur	: <i>Thermocouple</i> tipe K
<b>• Sistem Pendingin <i>Cooling Char</i></b>	
Sistem Sirkulasi Air	: <i>Water Pump</i>

2. Sampel *Mahogany Wood chip* (*Swietenia macrophylla*)

Sampel biomassa kayu mahoni yang berbentuk *wood chip* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *wood chip* mahoni dengan ukuran 2 - 4 cm dan memiliki tebal 0,3 - 0,5 cm dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 *Mahogany Wood chip*

Sampel Biomassa *Mahogany Wood chip* pada kondisi mentah memiliki karakteristik kimia yang bisa dilihat pada tabel 3.3

Tabel 3. 2 Komposisi Kimia *Mahogany Wood chip* (Mulhidin dkk.,2018).

Komponen Kimia	Kadar kandungan (%)
<i>Hemiselulosa</i>	28,94%
<i>Lignin</i>	35,40%
<i>Selulosa</i>	35,38%
<i>Moisture</i>	6,16%
<i>Volatile matter</i>	81,00%
<i>Fixed carbon</i>	11,92%
<i>Ash</i>	0,91%

3. *Temperature Memory Logger*

*Temperature Memory Logger* merupakan alat perekam data (*memory logger*) *multi channel* yang digunakan untuk mencatat parameter listrik maupun non-listrik dalam jangka waktu tertentu. Alat ini dilengkapi dengan modul input U8554 (*Voltage/Temperature Unit*) yang berfungsi untuk mengukur tegangan DC dan temperatur menggunakan sensor *thermocouple*. Alat ini mampu merekam data secara *real time*,

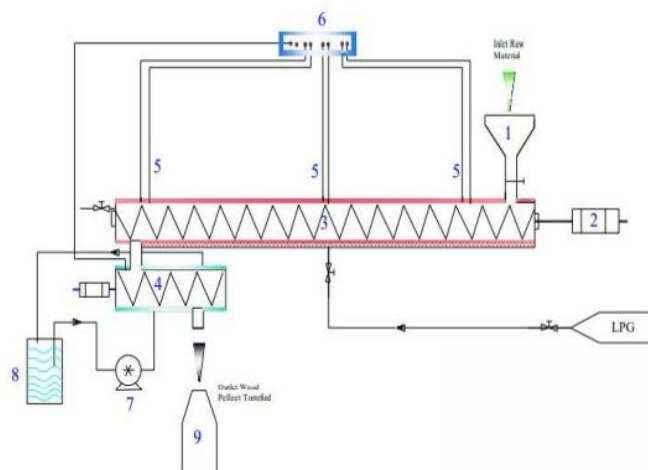
menyimpannya dalam memori internal atau eksternal, serta menampilkan grafik pengukuran pada layar. Dengan kemampuan multikanal, logger ini memungkinkan pencatatan suhu di banyak titik sekaligus, sehingga sangat sesuai untuk pengujian eksperimen termal maupun analisis performa material.



Gambar 3. 3 *Temperature Memory Logger*

#### 4. Alat Pendukung Eksperimen

Alat pendukung yang digunakan dalam proses eksperimen torefaksi ini adalah seperti regulator LPG, Gas LPG, pompa air, pemantik api, terminal kabel listrik, termokopel, timbangan digital, wadah *stainless steel*, plastik cetik, label, pena, kamera, dan laptop.



Gambar 3. 4 Skema Pengujian Reaktor Torefaksi

( Apriyanto dkk, 2018).

Keterangan :

1. *Feeding Hooper*
2. *Electromotor*
3. Tabung Reaktor dilengkapi dengan burner
4. *Cooling Char*
5. *Thermocouple*
6. *Temperature Memory Logger*
7. *Water pump*
8. *Water tank*
9. Penampung produk torefaksi

### 3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sampel biomassa *wood chip* mahoni dengan ukuran yang tidak seragam atau berbentuk *wood chip* dengan rentang ukuran sebesar 2 - 4 cm dengan tebal 0,3 - 0,5 cm. Sampel dilakukan perlakuan proses torefaksi dengan tiga variasi waktu tinggal (*residence time*) diantaranya 10, 20, dan 30 menit dengan dua variasi temperatur sebesar 250°C, 275°C, dan 300°C. Massa sampel biomassa *wood chip* mahoni dari masing-masing waktu tinggal yang akan digunakan adalah 0,5 kg, sehingga total massa biomassa untuk semua variasi waktu tinggal dan temperatur pada penelitian ini adalah 4,5 kg. Rancangan penelitian ini adalah dengan mengamati beberapa parameter diantaranya nilai kalor, nilai *proximate*, *mass yield*, *energy yield*, *hydrophobicity analysis*. Rancangan Penelitian pada tugas akhir ini adalah dengan mengamati beberapa parameter diantaranya, nilai kalor, *mass yield*, *energy yield*, *proximate analysis*, dan *hydrophobicity analysis* dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3. 3 Rancangan Penelitian

Variabel	Suhu (°C)	Waktu Tinggal (Menit)	Massa Sampel (Kg)	Parameter Yang Diamati
1	250°C	30	0,5 Kg	<i>Calorific value, Mass yield, Energy yield, Proximate analysis, dan hydrophobicity analysis</i>
2	250°C	20		
3	250°C	10		
4	275°C	30		
5	275°C	20		
6	275°C	10		
7	300°C	30		
8	300°C	20		
9	300°C	10		

### 3.4 Prosedur Pengujian

#### 3.4.1 Prosedur Pengujian Torefaksi

Berikut adalah prosedur pengujian torefaksi pada penelitian ini:

1. Mempersiapkan alat yang akan digunakan dalam pengujian baik alat utama dan alat pendukung.
2. Mempersiapkan bahan utama yang akan diujikan yaitu sampel biomassa.
3. Memasang Pulley dan belt sesuai dengan waktu tinggal yang diinginkan ke *gearbox* pada reaktor.
4. Menghubungkan tabung LPG 12 kg ke regulator dan meletakan tabung LPG 12 kg ke dalam baskom yang berisi air sirkulasi *cooling char*.
5. Menghubungkan pompa air sirkulasi ke *cooling char* dengan menggunakan selang.
6. Memasang seluruh *thermocouple* yang ada pada reaktor dan *cooling char* ke *temperature memory logger*.

7. Menghidupkan motor penggerak *screw conveyor* dengan cara menghubungkan kabel listrik pada reaktor ke terminal, lalu tekan tombol “on” pada reaktor.
8. Menyalakan api *burner* dengan bantuan pematik api dan mengatur bukaan katup pada regulator LPG dan katup aliaran gas pada reaktor.
9. Menunggu temperatur T1,T2 dan T3 mencapai temperatur 250°C.
10. Menjaga temperatur T1,T2 dan T3, apabila sudah mencapai temperatur yang diinginkan supaya tetap stabil dengan mengatur katup pada regulator LPG dan tunggu 10-15 menit sampai temperatur stabil.
11. Memasukkan sampel *wood chip hevea brasiliensis* ke dalam reaktor melalui *hooper* dan menunggu sampel keluar dengan residence time selama 10 menit.
12. Mendorong pendorong besi pada *cooling char*, setelah 10 menit sesaat sampel dimasukkan ke dalam reaktor dan membuka katup pengeluaran pada *cooling char*.
13. Menaikan temperatur dengan memperbesar bukaan katup regulator LPG hingga T1,T2 dan T3 mencapai temperatur 275°C dan ulangi langkah 11 – 12.
14. Menaikan temperatur dengan memperbesar bukaan katup regulator LPG hingga T1,T2 dan T3 mencapai temperatur 300°C dan ulangi langkah 11 – 12.
15. Ulangi langkah 7 – 12 untuk variasi waktu tinggal yang akan diujikan yaitu 20 dan 30 menit dengan menukar pulley pada gearbox.

#### 3.4.2 Prosedur Pengujian *Calorific value*

Berikut merupakan prosedur pengujian *calorific value* menggunakan *Oxygen Bomb Calorimeter*:

1. Menyiapkan Unit Bomb Calorimeter dan memastikan area sekitar unit bersih serta tidak ada rembesan air.
2. Memasang steker unit ke stop kontak.
3. Menyalakan unit dengan menekan tombol power hingga tombol berwarna merah dan layar sudah menyala.

4. Mengeluarkan sensor temperatur yang ada di bagian atas unit tepatnya pada tutup bucket unit.
5. Membuka tutup bucket unit dengan posisi  $\pm 90^\circ$  ke atas.
6. Mengeluarkan inner bucket untuk disiapkan, siapkan komponen lainnya yaitu oxygen bomb, *crucible*, dan *ignition wire*.
7. Menyiapkan oxygen bomb head holder yang digunakan sebagai dudukan pada saat proses pemasangan kawat pada oxygen bomb.
8. Membersihkan semua komponen yang telah disiapkan setiap sebelum pengujian dilakukan.
9. Memastikan sampel yang digunakan bersih dan layak untuk dilakukan 28 proses pengujian.
10. Menyiapkan sampel yang akan di uji sebanyak 1 gram (jika sampel tidak pas 1 gram maka isi sampel sesuai berat sampel).
11. Menyiapkan timbangan yang telah di kalibrasi.
12. Melakukan penimbangan terhadap *crucible* yang akan digunakan.
13. Melakukan kalibrasi atau nol kan kembali timbangan untuk menimbang sampel yang akan di uji.
14. Menambahkan sampel secara perlahan ke dalam *crucible* hingga mencapai berat yang diinginkan dengan menggunakan sendok atau spatula bersih.
15. Mengangkat *crucible* dengan penjepit dengan penjepit atau alat bantu lain untuk menghindari kontaminasi, lalu letakkan di dalam bomb calorimeter.
16. Membuka bomb silinder dengan memutar berlawanan arah jarum jam hingga bomb silinder bisa dipisahkan dengan header bomb.
17. Menempatkan header bomb di head holder.
18. Meletakkan *crucible* yang telah di isi dengan sampel uji ke *crucible holder*.
19. Memasangkan kawat *ignition*, pastikan menyentuh permukaan dalam sampel dan tidak boleh menyentuh *crucible* serta klem kawat untuk menjaga kawat tetap terhubung dengan baik.
20. Mengisi bomb silinder dengan aquadest sebanyak 10 ml.

21. Memasang kembali header bomb ke bomb silinder dengan memutar bagian bomb silinder searah jarum jam secara hati-hati agar menjaga kawat dan sampel dalam crucible tetap berada dalam kondisi yang sama.
22. Memasukkan oksigen ke dalam bomb oxygen dengan nepel oxygen yang dipasangkan ke inlet bomb oxygen, dengan tekanan 2,8- 3 Mpa.
23. Mengisi inner bucket dengan air temperatur ruang sampai menutup atau setengah dari inlet oxygen dan masukkan kembali sesuai posisi semula.
24. Memasukkan bomb oxygen ke dalam inner bucket dengan menggunakan holder yang telah disediakan.
25. Menutup cover bucket dengan rapat dan masukkan kembali sensor temperatur pada posisinya.
26. Membuka tampilan jendela utama dan pilih "*Self-Inspection*" kemudian klik "*On*" pada stirring motor untuk melakukan mixing pada bucket 29 sebelum pengujian dilakukan, setelah 1 menit klik "*Off*".
27. Melakukan klik back untuk kembali ke jendela utama dan melakukan "*Data Setting*" dan memasukkan berat sampel dan data kalibrasi.
28. Melakukan klik "*Start*" untuk memulai pengujian dan hasil pengujian akan menampilkan nilai pada kotak layar dalam satuan cal/g.
29. Mengeluarkan sensor temperatur pada cover unit apabila pengujian telah selesai.
30. Membuka cover unit dan keluarkan bomb calorimeter dari inner bucket dengan mengangkatnya menggunakan holder.
31. Mengeluarkan oxygen pada bomb oxygen menggunakan alat yang disiapkan dengan menekan katup bomb oxygen sampai oxygen tidak bersisa.

32. Membuka head bomb dari silinder bomb dan bersihkan seluruh komponen yang telah digunakan.
33. Melakukan tahapan yang sama untuk setiap pengujian selanjutnya.

#### 3.4.3 Prosedur Pengujian *Hydrophobicity*

Berikut Adalah prosedur pengujian *hydrophobicity* pada penelitian ini:

1. Siapkan sampel *wood chip* yang akan diuji.
2. Siapkan wadah berisi air dengan volume yang cukup untuk merendam sampel.
3. Timbang sampel menggunakan neraca digital dengan ketelitian tinggi untuk memperoleh massa awal sampel kering.
4. Masukkan sampel ke dalam wadah air dan pastikan seluruh bagian terendam.
5. Catat waktu saat sampel mulai bersentuhan dengan air. Sampel ditenggelamkan sepenuhnya ke dalam air pada suhu ruang selama 2 jam tanpa pengadukan.
6. Mengeringkan permukaan sampel setelah direndam selama 2 jam.
7. Timbang sampel menggunakan neraca digital dengan ketelitian tinggi untuk memperoleh massa akhir setelah perendaman.
8. Melakukan perhitungan penyerapan air pada sampel.
9. Catat hasil pengujian dan simpulkan tingkat ketahanan *wood chip* terhadap air.

### 3.5 Parameter Penelitian

Parameter utama penelitian yang digunakan dalam penelitian torefaksi ini adalah variasi waktu tinggal (*residence time*) dan temperatur. Hal ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik terbaik dari sampel *wood chip* mahoni pada saat temperatur 250°C, 275°C dan 300°C dengan waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit proses torefaksi pada penelitian ini menggunakan reaktor kontinu tipe tubular. Untuk mendapatkan parameter waktu tinggal dan temperatur yang optimal pada proses torefaksi pada penelitian ini menggunakan sampel

biomassa kayu mahoni berbentuk *wood chip* dengan ukuran 2 – 4 cm dengan tebal 0,3 – 0,5 cm dengan basis pengujian *as – received* (ar). Analisis yang dilakukan pada penelitian kali ini adalah untuk mengetahui karakteristik dari produk bahan bakar padat hasil proses torefaksi berupa nilai *proximate*. Selain itu juga dilakukan pengujian terhadap nilai kalor dari sampel biomassa mentah serta hasil torefaksi untuk mengetahui besar nilai persatuan massa dari masing-masing waktu tinggal. Pada penelitian ini juga mencakup seberapa jauh proses torefaksi dapat meningkatkan kualitas sifat-sifat pembakaran dari sampel biomassa pada kondisi *as-received* dengan mencari nilai *mass yield* dan *energy yield*.

### 3.6 Tahapan Penelitian

Adapun untuk tahapan-tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

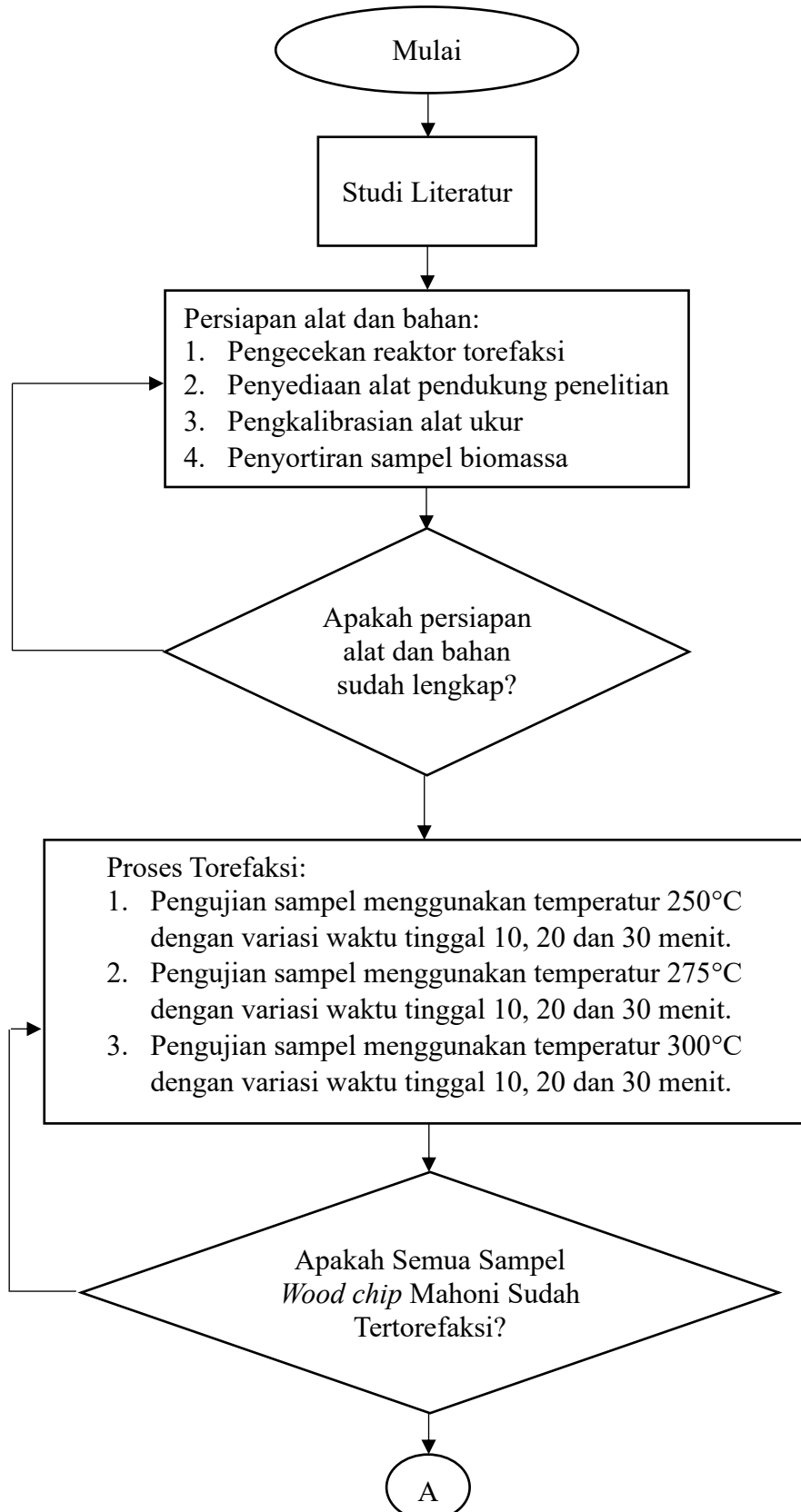
1. Studi Literatur: Tahapan pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah studi literatur dari berbagai sumber jurnal dan buku tentang biomassa, torefaksi, reaktor torefaksi, karakteristik bahan bakar padat, mekanisme torefaksi dan potensi biomassa sebagai sumber energi alternatif.
2. Persiapan alat torefaksi: Pada tahapan kedua mempersiapkan pulley yang sesuai dengan kebutuhan waktu tinggal dan persiapan alat yang dibutuhkan dalam penelitian. Semua peralatan dipersiapkan baik itu alat utama maupun pendukung diantaranya yaitu mengganti thermocouple yang telah rusak serta membeli peralatan pendukung seperti pemantik api, gas LPG, wadah sampel dan baterai untuk timbangan dan temperature recorder catalogger.
3. Proses Pengujian Torefaksi: Pada tahapan ini dilakukan pengujian torefaksi dengan sampel *wood chip* mahoni sebanyak 1x pengujian untuk setiap variasi waktu tinggal yang digunakan yaitu 10, 20 dan 30 menit, dengan dua variasi temperatur digunakan yaitu 250°C, 275°C, dan 300°C.
4. Pengujian Laboratorium: Pada tahapan ini produk mentah sampel dan produk hasil torefaksi yang telah diperoleh akan dilakukan uji laboratorium

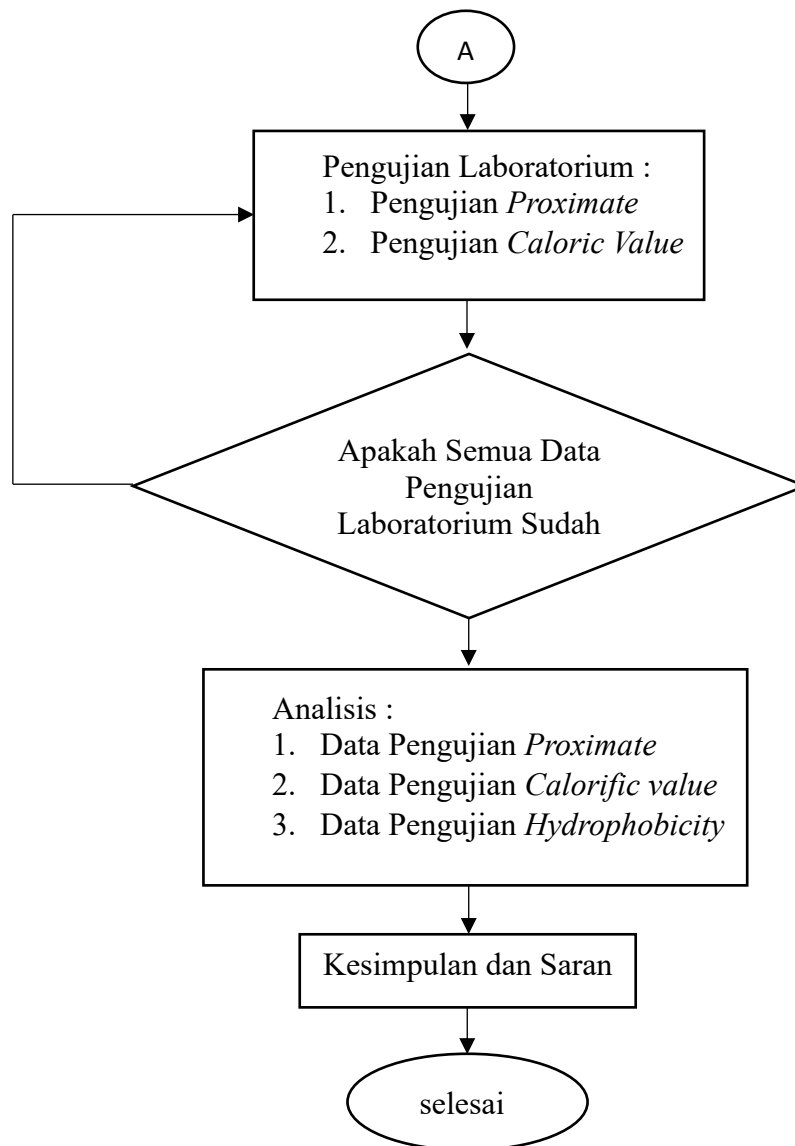
untuk setiap variasi yang digunakan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kalor dari produk, dan nilai *proximate*.

5. Analisis Hasil Seluruh Pengujian: Setelah semua data telah terkumpul termasuk hasil pengujian laboratorium, tahapan selanjutnya adalah menganalisis semua data pengujian hasil laboratorium. Analisis yang dilakukan meliputi analisis *proximate*, *calorific value*, *energy yield*, *mass yield*, dan *hydrophobicity analysis*.
6. Kesimpulan: Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah dengan membuat kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan dituangkan dalam bentuk laporan tugas akhir.

### 3.7 Diagram Alur Penelitian

Adapun untuk diagram alur penelitian tentang pengujian sampel biomassa dengan proses torefaksi adalah sebagai berikut :





## V. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis penelitian yang telah dilakukan didapatkan Kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses torefaksi chip kayu mahoni memengaruhi *mass yield* dan *energy yield*, yang keduanya cenderung menurun seiring dengan meningkatnya temperatur dan waktu tinggal. Nilai *mass yield* tertinggi diperoleh pada kondisi 250 °C selama 10 menit sebesar 80%, sedangkan nilai terendah diperoleh pada kondisi 300 °C selama 30 menit yaitu sebesar 52%. Nilai *energy yield* tertinggi juga diperoleh pada kondisi 250 °C selama 10 menit sebesar 95,79%, sedangkan nilai terendah terdapat pada kondisi 300 °C selama 30 menit sebesar 69,79%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin berat tingkat proses torefaksi, semakin besar kehilangan massa dan energi pada produk padat hasil torefaksi.
2. Proses torefaksi meningkatkan nilai kalor *wood chip* mahoni, nilai kalor sampel *raw* sebesar 4733,43 kcal/kg sebelum proses torefaksi. Sementara itu Nilai kalor produk torefaksi tertinggi diperoleh pada kondisi 300°C waktu tinggal 30 menit yaitu sebesar 6352,92 kcal/kg, sedangkan nilai kalor terendah pada sampel hasil torefaksi terdapat pada kondisi 275°C waktu tinggal 20 menit yaitu sebesar 4997,52 kcal/kg. Secara umum, peningkatan temperatur dan waktu tinggal cenderung meningkatkan nilai kalor, yang menunjukkan bahwa torefaksi mampu memperbaiki kualitas energi chip kayu mahoni sebagai bahan bakar padat

3. Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa proses torefaksi pada 300 °C selama 30 menit mampu meningkatkan kualitas chip kayu mahoni sebagai bahan bakar padat, yang ditandai dengan penurunan *moisture content* dari 6,195% menjadi 4,26%, penurunan *volatile matter* dari 81,3% menjadi 72,53%, serta peningkatan persentase *fixed carbon* dari 11,73% menjadi 21,745%. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa torefaksi mampu menghasilkan bahan bakar yang lebih kering, lebih stabil, dan lebih kaya karbon. Namun demikian, persentase *ash content* juga meningkat dari 0,77% menjadi 1,465%, karena sebagian fraksi bahan organik biomassa terdekomposisi dan menguap selama proses torefaksi.
  
4. Hasil pengujian hidrofobisitas menunjukkan bahwa proses torefaksi mampu menurunkan nilai penyerapan air produk torefaksi, jika dibandingkan dengan sampel *raw* yaitu sebesar 24,67%. Nilai persentase penyerapan air terendah diperoleh pada kondisi 300 °C selama 30 menit sebesar 9,93%, sedangkan pada kondisi 250 °C selama 10 menit masih tergolong tinggi yaitu 23,53% belum terlalu menurun jika dibandingkan dengan sampel *raw*. Secara umum, peningkatan temperatur dan waktu tinggal cenderung menurunkan kemampuan sampel dalam menyerap air, yang menunjukkan bahwa produk hasil torefaksi menjadi semakin hidrofobik. Dengan demikian, torefaksi pada kondisi yang lebih tinggi mampu meningkatkan ketahanan chip kayu mahoni terhadap penyerapan air dan memperbaiki kualitasnya sebagai bahan bakar padat.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terkait pengujian ultimate biomassa dengan tujuan untuk mengetahui kandungan (C, H, N, O, S) pada sampel *raw wood chip mahoni* dan produk hasil torefaksi. karena informasi ini diperlukan untuk memahami perubahan komposisi unsur selama proses

torefaksi, memperkirakan potensi emisi gas buang, serta menilai sejauh mana karakteristik produk torefaksi *wood chip* mahoni mendekati batubara peringkat rendah.

2. Diperlukan sensor otomatis yang terhubung dengan pengontrol temperatur, yang dapat mengurangi panas yang dihasilkan saat temperatur mencapai batas tertentu, begitu juga sebaliknya jika temperatur belum mencapai batas yang diinginkan. Sehingga temperatur dapat dijaga tetap stabil dengan sistem otomatis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ajikashile, J. O., Alhnidi, M.-J., Bishir, M., dan Kruse, A. 2023. The influence of torrefaction temperature and reaction time on the properties of torrefied sun-dried millet and sorghum straws from the arid and semi-arid zones of western Africa. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(4), 751–767. <https://doi.org/10.1002/bbb.2464>
- Akbar, M. F., Marlina, E., dan Robbi, N. 2022. Karakteristik pembakaran wood pellet kayu mahoni dan sekam padi dengan metode single wood pellet. *Jurnal Teknik Mesin, Universitas Islam Malang*, 44–52.
- Amrul, Triyadi, D., dan Gandidi, I. M. 2019. Simulasi proses torefaksi sampah sistem kontinu menggunakan software Aspen Plus. *Jurnal Mechanical*, 10(1), 19–22.
- Apriyanto, A., Amrul, dan Amrizal. 2018. Rancang bangun dan analisis unjuk kerja reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas oil jacket. *Jurnal Mechanical*, 9(2), 54–66.
- Barmina, I., dkk. 2018. Investigation of the combustion characteristics of biomass pellets in a pilot-scale furnace. *Energy Procedia*, 147, 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.067>
- Barontini, F., Biagini, E., dan Tognotti, L. 2021. Influence of torrefaction on biomass devolatilization. *ACS Omega*, 6(31), 20264–20278. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02141>
- Chandrasekharan Nair, S., John, V., Geetha Bai, R., dan Kikas, T. 2025. Torrefaction of lignocellulosic biomass: A pathway to renewable energy, circular economy, and sustainable agriculture. *Sustainability*, 17, 7738. <https://doi.org/10.3390/su17177738>
- Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., dan Ma, Z. 2018. Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose,

- cellulose, and lignin. *Energy Conversion and Management*, 169, 228–237.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.063>
- 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., dan Pétrissans, M. 2021. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82, 100887.  
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- Chukwunneke, J. L., Ewulonu, M. C., Chukwujike, I. C., dan Okolie, P. C. 2019. Physico-chemical analysis of pyrolyzed bio-oil from *Swietenia macrophylla* (mahogany) wood. *Heliyon*, 5(6), e01790.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01790>
- Devaraja, U. M. A., Dissanayake, C. L. W., Gunarathne, D. S., dan Chen, W.-H. 2022. Oxidative torrefaction and torrefaction-based biorefining of biomass: A critical review. *Biofuel Research Journal*, 35, 1672–1696.  
<https://doi.org/10.18331/BRJ2022.9.3.4>
- Devekiran, G., dan Sarptaş, H. 2025. Torrefaction of hazelnut shells: The effects of temperature and retention time on energy yield and fuel characteristics. *Energies*, 18, 4710. <https://doi.org/10.3390/en18174710>
- Dirgantara, M., Karelius, Cahyana, B. T., Suastika, K. G., dan Akbar, A. R. M. 2020. Effect of temperature and residence time torrefaction palm kernel shell on the calorific value and energy yield. *Journal of Physics: Conference Series*, 1428, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1428/1/012010>
- Djurdjevic, M., dan Papuga, S. 2023. Torrefaction: Process parameters and reactor design. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 67(3), 416–426.  
<https://doi.org/10.3311/PPch.22081>
- Farooq, M. U., Sadiq, K., Anis, M., Hussain, G., Usman, M., Fouad, Y., Mujtaba, M. A., Fayaz, H., dan Silitonga, A. S. 2024. Turning trash into treasure: Torrefaction of mixed waste for improved fuel properties. A case study of metropolitan city. *Heliyon*, 10, e28980.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28980>
- Guo, S., Deng, X., Zhao, D., Zhu, S., Qu, H., Li, X., dan Zhao, Y. 2024. An optimized method for evaluating the preparation of high-quality fuel from

- various types of biomass through torrefaction. *Molecules*, 29, 1889. <https://doi.org/10.3390/molecules29081889>
- He, Y., Zhang, S., Liu, D., Xie, X., dan Li, B. 2023. Effect of biomass particle size on the torrefaction characteristics in a fixed-bed reactor. *Energies*, 16(3), 1104. <https://doi.org/10.3390/en16031104>
- Ibitoye, S. E., Jen, T.-C., Mahamood, R. M., dan Akinlabi, E. T. 2021. Improving the combustion properties of corncob biomass via torrefaction for solid fuel applications. *Journal of Composites Science*, 5, 260. <https://doi.org/10.3390/jcs5100260>
- Iglesias Canabal, A., Proupin Castiñeiras, J., Rodríguez Añón, J. A., Eimil Fraga, C., dan Rodríguez Soalleiro, R. 2023. Predicting the energy properties of torrefied debarked pine pellets from torrefaction temperature and residence time. *Renewable Energy*, 218, 119346. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119346>
- Ivanovski, M., Goričanec, D., dan Urbancl, D. 2023. The evaluation of torrefaction efficiency for lignocellulosic materials combined with mixed solid wastes. *Energies*, 16(9), 3694. <https://doi.org/10.3390/en16093694>
- Ivanovski, M., Petrovič, A., Goričanec, D., Urbancl, D., dan Simonič, M. 2023. Exploring the properties of the torrefaction process and its prospective in treating lignocellulosic material. *Energies*, 16, 6521. <https://doi.org/10.3390/en16186521>
- Kalifa, M. A., Habtu, N. G., Jembere, A. L., dan Genet, M. B. 2024. Characterization and evaluation of torrefied sugarcane bagasse to improve the fuel properties. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 8, 100395. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100395>
- Khairy, M., Amer, M., Ibrahim, M., Ookawara, S., Sekiguchi, H., dan Elwardany, A. 2024. The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(12), 17127–17148. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03822-9>
- Krisnawati, H., Kallio, M., dan Kanninen, M. 2011. *Swietenia macrophylla* King: Ecology, silviculture and productivity. CIFOR. <https://doi.org/10.17528/cifor/003395>

- Leoni, E., Mancini, M., Aminti, G., dan Picchi, G. 2021. Wood fuel procurement to bioenergy facilities: *Analysis of moisture content* variability and optimal sampling strategy. *Processes*, 9(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr9020359>
- Li, Y., Liu, P., Dong, L., Lang, P., dan Lei, T. 2025. Evolution of oxygen-containing functional groups during torrefaction and its effect on pyrolysis behaviors and hydrogen production from different lignocellulosic biomasses. *Applications in Energy and Combustion Science*, 24, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2025.100421>
- Livingston, W. R., Middelkamp, J., Willeboer, W., Tosney, S., Sander, B., Madrali, S., Hansen, M. T., Koppejan, J., dan Cremers, M. F. G. 2016. *The status of large-scale biomass firing: The milling and combustion of biomass materials in large pulverised coal boilers*. IEA Bioenergy.
- Mulhidin, Yuliansyah, A. T., dan Prasetya, A. 2018. Hydrothermal liquefaction of mahogany (*Swietenia macrophylla*) sawdust. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 7(1), 12–17. <https://doi.org/10.15294/jbat.v7i1.12410>
- Mutlu, Ö., Ceylan, R., dan Yilmaz, H. 2016. Torrefaction of grape pomace and its characterization. *Thermal Science*, 20(1), 95–103. <https://doi.org/10.2298/TSCI141215111M>
- Nazos, A., Politi, D., Giakoumakis, G., dan Sidiras, D. 2022. Simulation and optimization of lignocellulosic biomass wet- and dry-torrefaction process for energy, fuels and materials production: A review. *Energies*, 15, 9083. <https://doi.org/10.3390/en15239083>
- Ong, H. C., Yu, K. L., Chen, W.-H., Pillejera, M. K., Bi, X., Tran, K.-Q., Pétrissans, A., dan Pétrissans, M. 2021. Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111698. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111698>
- Orisaleye, J. I., Jekayinfa, S. O., Pecenka, R., Ogundare, A. A., Akinseloyin, M. O., dan Fadipe, O. L. 2022. Investigation of the effects of torrefaction temperature and residence time on the fuel quality of corncobs in a fixed-bed reactor. *Energies*, 15, 5284. <https://doi.org/10.3390/en15145284>
- Park, S., Kang, K. S., Oh, K. C., Kim, S. J., Prasad, P. P., Kim, S. Y., Kim, H. E., Shin, J. Y., dan Kim, D. 2025. Development and validation of mass reduction

- prediction model during torrefaction using biomass chemical composition analysis. *PLOS One*, 20(5), e0323940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323940>
- Phanphanich, M., dan Mani, S. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246–1253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- Piersa, P., Unyay, H., Szufa, S., Lewandowska, W., Modrzewski, R., Ślęzak, R., dan Ledakowicz, S. 2022. An extensive review and comparison of modern biomass torrefaction reactors vs. biomass pyrolysis—Part 1. *Energies*, 15(6), 2227. <https://doi.org/10.3390/en15062227>
- Pramudiyanto, A. S., dan Suedy, S. W. A. 2020. Energi bersih dan ramah lingkungan dari biomassa untuk mengurangi efek gas rumah kaca dan perubahan iklim yang ekstrim. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 1(3), 86–99. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9990>
- Pranolo, S. H., Waluyo, J., Paryanto, Susanti, A. D., Permana, R. B., Erwanda, I., Delayaski, N., Alhaq, A. I., dan Putro, F. A. 2022. Feasible tar cleaning method of producer gas from palm kernel shell and mahogany fruit shell gasification. *Materials Today: Proceedings*, 63, S237–S243. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.431>
- Sabil, K. M., Aziz, A. A., Lal, B., dan Dollah, M. Z. 2013. Torrefaction of oil palm biomass for energy production. *Biomass and Bioenergy*, 56, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.012>
- Sarker, T. R., Nanda, S., Dalai, A. K., dan Meda, V. 2021. A review of torrefaction technology for upgrading lignocellulosic biomass to solid biofuels. *BioEnergy Research*, 14, 645–669. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10236-2>
- Sudiryanto, G., dan Suharto. 2020. Analisa jenis limbah kayu di Jepara. *Jurnal Disprotek*, 11(1), 47–56. <https://doi.org/10.32528/disprotek.v11i1.1163>
- Suharyatun, S., Farisi, M. N., Rahmawati, W., dan Haryanto, A. 2022. Valorization of corncob through torrefaction process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1034(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1034/1/012036>

- Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., dan Sokhansanj, S. 2021. Biomass torrefaction process, product properties, reactor types, and moving bed reactor design concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9, 728140. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>
- Waheed, M. A., Akogun, O. A., dan Enweremadu, C. C. 2022. An overview of torrefied bioresource briquettes: Quality-influencing parameters, enhancement through torrefaction and applications. *Bioresources and Bioprocessing*, 9, 122. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00608-1>
- Wahida, A., Hersanti, E. S., Pramono, A., Saleh, M., Sutarta, E. S., Setiawati, E., Sosiawan, H., Sutriadi, M. T., dan Husnain. 2021. Biochar-kompos berbasis limbah kelapa sawit: Bahan amandemen untuk memperbaiki kesuburan dan produktivitas tanah di lahan rawa. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 15(2), 103–116. <http://dx.doi.org/10.21082/jSDL.v15n2.2021.103-116>
- Wannapeera, J., dan Worasuwannarak, N. 2012. Characterization of tar and gases produced from wood during torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 96, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.011>
- Yadav, S., dan Singh, D. 2023. Assessment of biochar developed via torrefaction of food waste as feedstock for steam gasification to produce hydrogen-rich gas. *Carbon Research*, 2(34). <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00065-1>
- Yang, X., Zhao, Y., Zhang, L., Wang, Z., Zhao, Z., Zhu, W., Ma, J., dan Shen, B. 2023. Effects of torrefaction pretreatment on the structural features and combustion characteristics of biomass-based fuel. *Molecules*, 28, 4732. <https://doi.org/10.3390/molecules28124732>
- Yun, H., Wang, Z., Wang, R., Bi, X., dan Chen, W. 2021. Identification of suitable biomass torrefaction operation envelopes for auto-thermal operation. *Frontiers in Energy Research*, 9, 636938. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.636938>
- Zhang, S., Zhang, Y., Zhang, X., Xing, D., Hu, J., Zhao, Z., dan Yao, L. 2025. Physicochemical properties of torrefied biomass at different atmosphere: A review. *Industrial Crops and Products*, 236, 121988. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121988>

Zheng, Y., Tao, L., Yang, X., Huang, Y., Liu, C., Gu, J., dan Zheng, Z. 2017. Effect of the torrefaction temperature on the structural properties and pyrolysis behavior of biomass. *BioResources*, 12(2), 3425–3447. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3425-3447>