

**PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP PENINGKATAN
SIFAT FISIS DAN NILAI KALOR
BLACK PELLET KAYU JABON (*Anthocephalus cadamba*)**

(Skripsi)

Oleh

YOGI SULISTIO



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2020**

ABSTRAK

PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP PENINGKATAN SIFAT FISIS DAN NILAI KALOR *BLACK PELLETT* KAYU JABON (*Anthocephalus cadamba*)

Oleh

YOGI SULISTIO

Jabon (*Anthocephalus cadamba*) adalah salah satu jenis kayu cepat tumbuh yang banyak ditanam di hutan Indonesia. Kayu jabon memiliki kualitas kayu yang relatif rendah yang membatasi penggunaannya. Salah satu alternatif penggunaan kayu jabon adalah dengan dikonversi menjadi pelet kayu untuk bioenergi. Pelet kayu jabon sebagai bioenergi masih mempunyai kekurangan seperti densitas yang rendah, kadar air yang tinggi, kemampuan menyerap air yang tinggi, dan nilai kalor yang rendah. Kekurangan tersebut dapat ditingkatkan dengan torefaksi. Torefaksi merupakan salah satu perlakuan termal biomassa dalam keadaan *inert* (oksigen yang dibatasi) pada kisaran suhu 200°C-300°C sehingga meningkatkan nilai tambah produk pelet. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh torefaksi dengan menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) dan *Electric Furnace* (EF) terhadap perubahan visual warna, rendemen, nilai kalor, kadar air, kerapatan, dan uji ketahanan dalam air pelet kayu jabon. Torefaksi dengan reaktor COMB dilakukan pada suhu 260°C dan 280°C durasi 3 menit dan

torefaksi menggunakan EF suhu 260°C dan 280°C durasi 20 menit. Pengujian pelet kayu jabon meliputi perubahan warna visual, sifat fisis, nilai kalor dan uji ketahanan terhadap air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa warna pelet kayu jabon berubah total setelah torefaksi dengan reaktor COMB dengan nilai perubahan warna (ΔE^*) tertinggi sebesar 21,9 pada pelet panjang dan 21,7 pada pelet ukuran pendek, sedangkan torefaksi dengan EF menghasilkan nilai (ΔE^*) tertinggi sebesar 28,6 pada pelet panjang dan 23,2 pelet pendek. Nilai rendemen pelet kayu jabon yang ditorefaksi dengan reaktor COMB pada suhu 280°C menghasilkan rendemen sebesar 86,59% untuk pelet panjang dan 74,35% untuk pelet pendek, sedangkan torefaksi dengan EF pada suhu 280°C menghasilkan rendemen sebesar 83,22% pada pelet panjang dan 73,81% pada pelet pendek. Kadar air awal pelet kayu jabon ukuran panjang dan pendek sebesar 12,41% dan 12,33% , setelah torefaksi dengan reaktor COMB menurun menjadi 2,85% dan 2,61%, sedangkan torefaksi menggunakan EF menurun menjadi 2,77% dan 2,58%. Kerapatan awal pelet ukuran panjang dan pendek sebesar 1,05 g/cm³ dan 0,97 g/cm³ setelah torefaksi suhu tinggi 280°C reaktor COMB menurun menjadi 0,91 g/cm³ dan 0,76 g/cm³ sedang torefaksi suhu tinggi 280°C EF menjadi 0,87 g/cm³ dan 0,75 g/cm³. Uji ketahanan pelet terhadap air setelah torefaksi dengan reaktor COMB maupun EF memperlihatkan bahwa meningkatkan sifat hidrofobik pelet kayu jabon. Hasil penelitian juga memperlihatkan bahwa nilai kalor awal pelet kayu jabon panjang dan pendek sebesar 17,69 MJ/kg meningkat sebesar 31,79 MJ/kg dan 32,02 MJ/kg setelah torefaksi suhu tinggi 280°C reaktor COMB, sedangkan 19,74 MJ/kg dan 19,99 MJ/kg setelah torefaksi dengan EF. Perlakuan

Yogi Sulistio

terbaik torefaksi dari penelitian ini yaitu menggunakan reaktor COMB suhu

280°C pelet berukuran panjang.

Kata kunci: *Counter-Flow Multi Baffle, electric furnace, jabon (Anthocephalus cadamba), torefaksi.*

**PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP PENINGKATAN
SIFAT FISIS DAN NILAI KALOR
BLACK PELLET KAYU JABON (*Anthocephalus cadamba*)**

Oleh

YOGI SULISTIO

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2020**

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang dan Masalah.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Kerangka Teoritis.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Biomassa.....	6
2.2 Kayu Jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>)	8
2.3 Biopelet.....	10
2.4 Torefaksi dan Reaktor Torefaksi	11
2.5 Reaktor <i>Counter-Flow Multi Baffle</i> (COMB).....	15
III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat.....	18
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.3 Metode Pengambilan Data.....	18
3.3.1 Persiapan Bahan	18
3.3.2 Proses Torefaksi COMB.....	19
3.3.3 Proses Torefaksi <i>Electric Furnace</i> (EF).....	21
3.4 Pengujian Pelet Kayu Jabon.....	23
3.4.1 Pengujian perubahan warna.....	23
3.4.2 Rendemen	24
3.4.3 Nilai kalor	24
3.4.4 Pengujian Sifat Fisis Pelet Kayu Jabon	25
3.4.4.1 Kadar Air	25
3.4.4.2 Kerapatan	25
3.4.4.3 Ketahanan terhadap air.....	26

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Perubahan Warna Pelet Kayu Jabon	27
4.2 Rendemen	31
4.3 Nilai Kalor	35
4.4 Sifat Fisis Pelet Kayu Jabon	39
4.4.1 Kadar Air	39
4.4.2 Kerapatan.....	41
4.4.3 Ketahanan Terhadap Air.....	43
V. SIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Simpulan	52
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	63
Dokumentasi Penelitian	64

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kandungan kimia kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>)	9
2. Standar biopelet di beberapa negara	11
3. Perubahan parameter warna pelet kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>).....	28
4. Rendemen pelet kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>)	32
5. Nilai kalor pelet kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>)	36
6. Nilai kadar air pelet kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>)	40
7. Nilai kerapatan pelet kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>).....	42
8. Uji ketahanan air pelet kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>).....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram alir kerangka pikir teoritis.	5
2. Sketsa reaktor <i>fixed bed</i>	13
3. Skersa reaktor <i>fluidized bed</i>	14
4. Sketsa reaktor <i>rotary kiln</i>	14
5. Sketsa reaktor <i>tubular</i>	15
6. Bagian-bagian reaktor <i>Counter Flow Multi Baffle (COMB)</i>	17
7. Sketsa bagian-bagian COMB.	21
8. Skema torefaksi menggunakan <i>Electric Furnace (EF)</i>	22
9. Tampilan visual warna pelet kayu jabon (<i>Anthocephalus cadamba</i>)....	31
10. Pensortiran pelet.	64
11. Penimbangan pelet sebelum torefaksi EF.	64
12. Proses torefaksi COMB.	65
13. Proses torefaksi EF.	65
14. Pengukuran kerapatan pelet.	66
15. Pengukuran kadar air pelet.	66

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Perkembangan ekonomi Indonesia yang terus meningkat di berbagai sektor berpengaruh pada peningkatan kebutuhan energi baik industri maupun kebutuhan rumah tangga (Syamsiro, 2016). Kebutuhan energi di Indonesia pada tahun 2010-2015 meningkat sekitar 1,3% per-tahun. Kebutuhan energi dalam kurun waktu 5 tahun ini didominasi oleh bahan bakar fosil seperti bensin, solar, minyak tanah, batu bara, dan avtur. Hal ini berpengaruh pada pengembangan sumber energi terbarukan menjadi salah satu alternatif pengganti bahan bakar fosil (BPPT, 2017; Aripin, 2013). Indonesia sebagai negara agraris memiliki potensi sumber daya energi baru terbarukan yang cukup besar dengan variasi yang beragam. Potensi sumber daya energi terbarukan terbanyak adalah tenaga air, disusul konversi energi termal lautan, dan biomassa (BPPT, 2017).

Biomassa adalah salah satu energi alternatif dalam bentuk energi padat yang berasal dari tumbuhan berlignoselulosa baik yang langsung digunakan berupa kayu bakar atau diproses terlebih dahulu berupa limbah serbuk gergajian kayu (Tampubolon, 2008). Kelebihan biomassa kayu sebagai energi alternatif antara lain ramah lingkungan dan mengurangi emisi rumah kaca. Namun biomassa kayu yang digunakan langsung sebagai bahan bakar mempunyai sifat-sifat yang kurang

menguntungkan, antara lain mempunyai kadar air tinggi, mengeluarkan asap, banyak abu, dan nilai kalornya rendah (Panwar *et al.*, 2011).

Kayu jabon merupakan salah satu biomassa yang banyak ditanam pada daerah hutan tropis seperti Indonesia, karena sifatnya yang cepat tumbuh dengan waktu pemanenan 5-6 tahun dan memiliki banyak pemanfaatannya dalam bahan baku industri seperti kayu lapis, *pulp*, dan bahan ukiran mebel (Mulyana *et al.*, 2010). Menurut Dinas Kehutanan Provinsi Lampung (2017) potensi hutan rakyat di Provinsi Lampung cukup menjanjikan dengan luasan seluruhnya sebesar 17,200 ha dan didominasi pohon cepat tumbuh seperti sengon (*Falcataria moluccana*) dan jabon (*Anthocephalus cadamba*). Namun menurut Peraturan Direktur Jenderal Bina Produksi Kehutanan No. P.13/VI-BPPHH/2009 tanggal 09 November 2009 tentang Rendemen Kayu Olahan Industri Primer Hasil Hutan Kayu (IPHHK) yang menjelaskan untuk kayu solid dengan asal bahan baku berupa kayu bulat olahan yang berasal dari hutan produksi, hutan rakyat dan hutan alam rendemennya berkisar antara 55%- 65%. Hal ini banyak meninggalkan limbah dari industri kayu yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku energi alternatif dalam bentuk pelet kayu (Gultom *et al.*, 2017).

Pelet kayu terbentuk dari serbuk gergajian yang dikompresi dalam suhu tinggi dan tekanan mengikat bersama-sama, karena adanya kandungan lignin (Kaygusuz *et al.*, 2017). Pelet kayu memiliki kelebihan seperti densitas yang lebih tinggi dan lebih mudah disimpan dan diangkut (Syamsiro, 2016). Namun pelet kayu masih memiliki beberapa kelemahan seperti nilai kalor yang rendah, kadar air tinggi, dan kemudahan menyerap air (Akbar *et al.*, 2013). Kualitas pelet kayu dapat

ditentukan dari proses produksi, ukuran partikel pelet, dan bahan baku pelet kayu (Arsad, 2014).

Salah satu cara untuk meningkatkan kualitas dari pelet kayu adalah dengan torefaksi. Torefaksi salah satu metode termal dalam pengolahan biomassa menjadi bahan bakar padat, saat proses torefaksi biomassa dipanaskan secara perlahan dalam keadaan *inert* atau tanpa oksigen dengan rentang suhu 200°C – 300°C serta waktu tertentu (Basu, 2010). Dalam penelitian ini, torefaksi dilakukan dengan menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB). Reaktor COMB mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan teknologi torefaksi lainnya. Salah satu kelebihan utamanya adalah waktu tinggal pelet biomassa yang singkat, yaitu hanya sekitar 3-5 menit. Torefaksi pada penelitian ini juga dilakukan dengan menggunakan *Electric Furnace* (EF) sebagai pembanding hasil dari torefaksi reaktor COMB.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh torefaksi reaktor COMB dan EF terhadap perubahan warna pelet kayu jabon.
2. Mengetahui pengaruh torefaksi reaktor COMB dan EF terhadap nilai kalor pelet kayu jabon.
3. Mengetahui pengaruh torefaksi reaktor COMB dan EF terhadap sifat fisis pelet kayu jabon.

1.3 Kerangka Teoritis

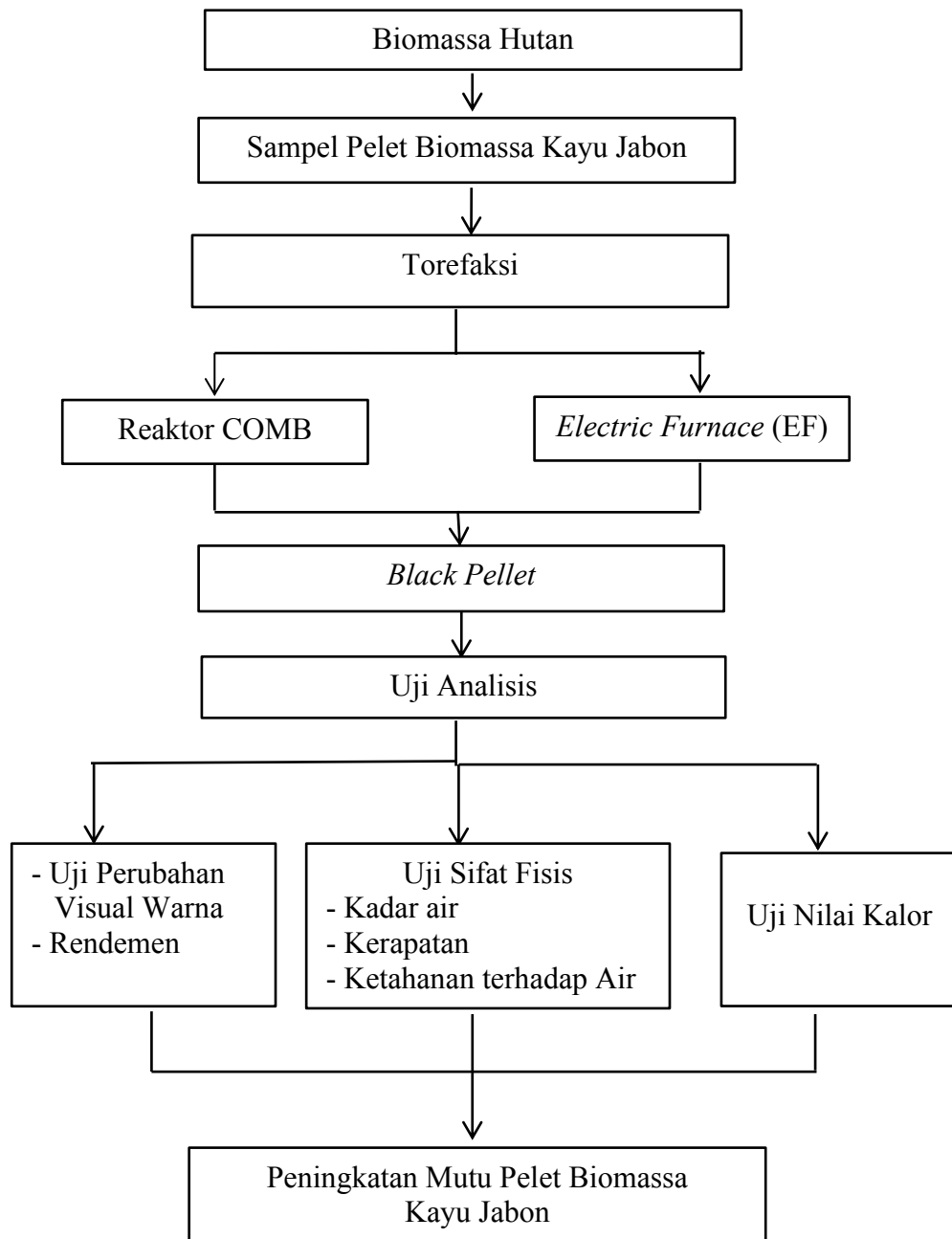
Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan mutu dari biomassa berupa pelet kayu yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Biomassa didefinisikan sebagai produk organik dari pertanian dan kehutanan yang dikembangkan untuk pasokan bahan bakar terbarukan (Yudha *et al.*, 2017).

Produk biomassa dari hutan salah satunya berupa pelet kayu. Pelet umumnya terbuat dari olahan limbah kayu dan atau limbah pertanian (Sukarta dan Okta, 2017).

Pelet yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelet biomassa dari serbuk gergajian kayu jabon. Pemilihan kayu jabon dilakukan karena memiliki kualitas kayu tersebut yang relatif rendah yang membatasi penggunaannya sehingga pencarian alternatif pemanfaatannya penting untuk dilakukan. Salah satu alternatif pemanfaatan kayu jabon menjadi produk yang bernilai tambah yaitu dengan mengonversi menjadi pelet kayu untuk bioenergi. Selain itu, jabon juga merupakan jenis tanaman yang cepat tumbuh dan banyak dikembangkan oleh petani hutan rakyat di Indonesia (Tampubolon, 2008). Pada penelitian ini pelet kayu jabon akan ditingkatkan sifat fisis dan nilai kalornya menjadi produk pelet hitam (*black pellet*) melalui metode torefaksi.

Torefaksi dilakukan dengan menggunakan reaktor COMB dan *Electric Furnace* (EF) dengan suhu perlakuan 260°C dan 280°C. Karakteristik pelet yang diuji meliputi uji perubahan warna, rendemen, nilai kalor, kadar air, kerapatan, dan ketahanan terhadap air.

Diagram alir kerangka pikir teoritis dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir kerangka pikir teoritis.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa dihasilkan dari tanaman hijau mengubah sinar matahari menjadi bahan tanaman melalui fotosintesis dan mencakup semua vegetasi darat, air dan semua yang berbasis limbah organik (Kendry, 2002). Menurut Vis Martin dan Berg Van Den (2010), biomassa dapat dikategorikan dalam empat kategori yaitu: (1) biomassa hutan dan limbah hutan, (2) tanaman energi, (3) limbah pertanian, dan (4) limbah organik. Biomassa memiliki tiga kandungan polimer yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan ini yang membuat biomassa berpotensi diolah menjadi energi terbarukan (Syamsiro, 2016).

Pengolahan limbah biomassa secara global dan ekonomi mencapai 20%-40% sehingga memiliki potensi untuk menjadi salah satu sumber energi utama di masa mendatang dan modernisasi sistem bioenergi yang berkelanjutan di masa depan khususnya bagi pembangunan di negara industri maupun di negara berkembang (Yudha *et al.*, 2017; Berndes *et al.*, 2003). Menurut Vis Martin dan Berg Van Den (2010), terdapat lima jenis potensi sumber energi biomassa: teoritis, teknis, ekonomis, implementasi, dan implementasi berkelanjutan. Secara teoritis, biomassa maksimum yang berada di daratan untuk diproduksi. Teknis pengelolaan biomassa menggunakan teknologi saat ini. Secara ekonomi

mengurangi biaya dalam produksi bahan bakar fosil. Implementasi fokus pada potensi teoritis dan teknis agar bisa memberi keuntungan dalam bidang ekonomi. Implementasi berkelanjutan merupakan bagaimana teori implementasi dapat terus berjalan dan memberi manfaat.

Studi yang dilakukan Calle *et al.* (2007) tentang analisa potensi biomassa menyebutkan bahwa terdapat persoalan utama dalam menghitung potensi pasokan biomassa dan menggunakan satuan yang sama dalam pengukuran nilai biomassa. Faktor yang mempengaruhi nilai biomassa adalah diameter tanaman, banyaknya jumlah tanaman, dan nilai berat jenis tanaman tersebut, karena semakin besar diameter suatu tanaman maka semakin besar juga nilai biomasanya dan nilai berat jenis tanaman yang tinggi juga sangat berpengaruh terhadap nilai biomassa yang besar dan juga semakin banyak jumlah tanamannya maka semakin besar juga nilai biomasanya (Armansyah,2010; Latifah *et al.*, 2016).

Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2015) potensi energi biomassa Indonesia diperkirakan mencapai 49,81 MW. Potensi ini diasumsikan dengan dasar kadar energi dari produksi tahunan sekitar 200 juta ton biomassa dari residu pertanian, kehutanan, perkebunan dan limbah organik perkotaan. Jumlah potensi yang besar tidak sebanding dengan kapasitas terpasang sebesar 302,40 MW atau hanya 0,64% yang dimanfaatkan. Apabila potensi biomassa yang ada dimaksimalkan, maka akan membantu bahan bakar fosil yang selama ini menjadi tumpuan dari penggunaan energi.

Besaran cadangan energi limbah biomassa perlu mempertimbangkan jumlah ketersediaannya, sehingga potensi energi limbah biomassa dihitung sebagai

bagian sumber energi yang tersedia dari keseluruhan stok. Ketersediaan biomassa saat ini diperkirakan 43 Exa Joule (EJ) untuk biomassa produksi limbah perternakan 48 EJ untuk biomassa pertanian, dan 37 EJ untuk biomassa kehutanan dengan total keseluruhan sekitar 128 EJ. Biomassa terbesar dari kotoran sapi sebesar 22 EJ dan diikuti dengan 20 EJ dari limbah kayu (Yokoyama, 2008).

2.2 Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*)

Pohon jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq) tumbuh secara alami di Australia, China, India, Indonesia, Malaysia, Papua Nugini, Filipina, Singapura dan Vietnam. Jenis tanaman jabon merupakan tumbuhan pionir yang dapat tumbuh baik pada jenis tanah aluvial yang lembab dan umumnya dijumpai di hutan primer Seperti di bantaran sungai, daerah berawa. Beberapa pohon jabon terkadang juga ditemukan di area hutan sekunder (Uar *et al.*, 2015; Krisnawati *et al.*, 2011).

Pohon jabon banyak dibudidayakan dalam areal hutan sekunder oleh petani hutan rakyat karena sifatnya yang cepat tumbuh dengan kualitas kayu yang relatif sama dengan jenis kayu cepat tumbuh lainnya. Kelebihan dari tanaman ini antara lain: pertumbuhan cepat, mudah beradaptasi pada berbagai tempat tumbuh dan perlakuan silvikultur relatif mudah (Krisnawati *et al.*, 2011). Kayu ini termasuk kayu lunak dengan Kelas Awet 5, sedangkan Kelas Kuat kayu jabon masuk Kelas Kuat 3 dengan berat jenis kayu rata-rata $0,42 \text{ g/m}^3$ yang dapat dimanfaatkan untuk lapisan inti atau lapisan permukaan vinir/kayu lapis, bahan papan partikel, dan kertas (*pulp*) (Mulyana *et al.*, 2010). Pengelolaan kayu menjadi produksi bidang industri dipengaruhi sifat fisis dan sifat kimia yang terdapat dalam kayu tersebut (Hastuti *et al.*, 2017).

Sifat fisis kayu meliputi informasi mengenai berat jenis dan kadar air. Berat jenis diperoleh dari volume kayu awal dan volume akhir pada suhu standar. Kayu jabon mempunyai berat jenis volume segar rata-rata $0,33 \text{ g/cm}^3$ dan volume kering rata-rata $0,37 \text{ g/cm}^3$. Kadar air merupakan perbandingan kadar air awal dan kadar air akhir, kayu jabon memiliki kadar air segar rata-rata 118,43%, dan kadar air kering udara 15,36% (Widiyanto dan Siarudin, 2016).

Sifat kimia kayu adalah informasi mengenai kandungan kimia yang terdapat pada kayu. Sifat kimia secara umum dibedakan menjadi 3 jenis senyawa kimia yakni karbohidrat (hemiselulosa dan selulosa), non-karbohidrat (lignin) dan zat ekstraktif pada proses pertumbuhan (Mulyana *et al.*, 2010). Menurut hasil penelitian dari Martawijaya *et al.* (1989) dan Emil (2013). Parameter dari kandungan kimia kayu pohon jabon dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan kimia kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*)

No	Komposisi Kimia Kayu Jabon	Jumlah
1	Selulosa (%)	52,40
2	Hemiselulosa (%)	32,60
3	Pentosan (%)	16,20
4	Lignin (%)	25,20
5	Abu (%)	0,80
6	Silika (%)	0,10
7	Kelarutan alkohol benzen (%)	4,70
8	Kelarutan air dingin (%)	1,60
9	Kelarutan air panas (%)	3,10
10	NaOH 1% (%)	18,40
11	Kalori (kal/gram)	4,73

Sumber: Martawijaya *et al.* (1989); Emil (2013).

2.3 Biopellet

Biopellet merupakan salah satu bentuk bahan bakar padat berbasis limbah biomassa dengan ukuran yang lebih kecil dari briket. Biopellet mempunyai kerapatan dan kesamaan ukuran yang lebih baik dibandingkan biobriket (Windarwari, 2011). Biopellet memiliki keseragaman ukuran, bentuk, kerapatan, densitas, kelembaban yang tinggi, dan nilai bakar. Bahan bakar padat ini memiliki ukuran diameter sebesar 6 mm-8 mm dan panjang sebesar 10 mm-12 mm dari proses pembuatannya (Mani *et al.*, 2006).

Proses pembuatan biopellet dilakukan 6 tahapan pembuatan biopellet yaitu: perlakuan pendahuluan bahan baku (*pretreatment*), pengeringan (*drying*), pengecilan ukuran (*size reduction*), pencetakan biopellet (*pelletization*), dan pendinginan (*cooling*) (Fantozzi dan Buratti, 2009). Secara umum peletisasi biomassa menjadi biopellet mempunyai beberapa keuntungan seperti menaikkan nilai kalori perunit volume, mudah disimpan, diangkut, dan mempunyai ukuran dan kualitas yang seragam untuk mempermudah dalam pemanfaatannya (Bhattacharya *et al.*, 1996). Biopellet juga mempunyai beberapa aspek kelemahan, seperti tingginya biaya investasi, kerapatan yang rendah, kadar air yang tinggi dan mudahnya pellet menyerap air di sekitar (Sylviani dan Suryandari 2013; Syamsiro, 2016).

Penggunaan bahan bakar biopellet telah lama dimanfaatkan oleh masyarakat negara Eropa dan beberapa negara Asia, mereka menggunakan biopellet bahan bakar mesin penghangat ruangan saat musim dingin (Winata, 2013). Biopellet di

negara Eropa dan Korea Selatan mempunyai standar mutu yang telah ditentukan yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Standar biopellet di beberapa negara

Parameter	Unit	Austria	Jerman	Swedia	Prancis	Korea Selatan
Diameter	mm	4,00-10,00	4,00-10,00	6,35-7,94	6,00-16,00	6,00-8,00
Panjang	mm	<20,00	<50,00	<3,81	10,00	≤32,00
Densitas	kg/cm ³	>1,12	1,00-1,40	>0,60	>1,15	≥0,64
Kadar air	%	<10,00	<12,00	<10,00	≤15,00	≤10,00
Kadar abu	%	<0,50	<1,50	<0,70	≤6,00	≤0,70
Nilai kalor	MJ/kg	>18,00	17,50-19,50	<19,08	>16,90	≥18,00

Sumber: Kementerian Perdagangan Republik Indonesia (2014).

2.4 Torefaksi dan Reaktor Torefaksi

Prinsip torefaksi pertama kali ditemukan tahun 1930 pada biomassa kayu untuk dijadikan bahan bakar gasifikasi (Nasrin *et al.*, 2011). Beberapa tahun terakhir torefaksi mendapatkan perhatian kembali, tetapi saat ini torefaksi digunakan sebagai teknologi meningkatkan mutu biomassa pada rantai produksi energi (Pratama *et al.*, 2017; Syamsiro, 2016). Torefaksi adalah metode termokimia pengelolaan biomassa pada suhu rendah 200°C-300°C dalam kondisi tanpa udara dengan menggunakan aliran gas *inert*/nitrogen, untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik mendekati batu bara (Maryanti *et al.*, 2017). Proses torefaksi mencapai kisaran suhu 220°C-260°C. Kandungan polimer biomassa selulosa, hemiselulosa dan lignin akan menyusut sehingga menyebabkan berat biomassa berkurang, densitas energi dari biomassa menjadi lebih tinggi dan merubah warna biomassa menjadi kecokelatan (Nasution dan Limbong, 2017).

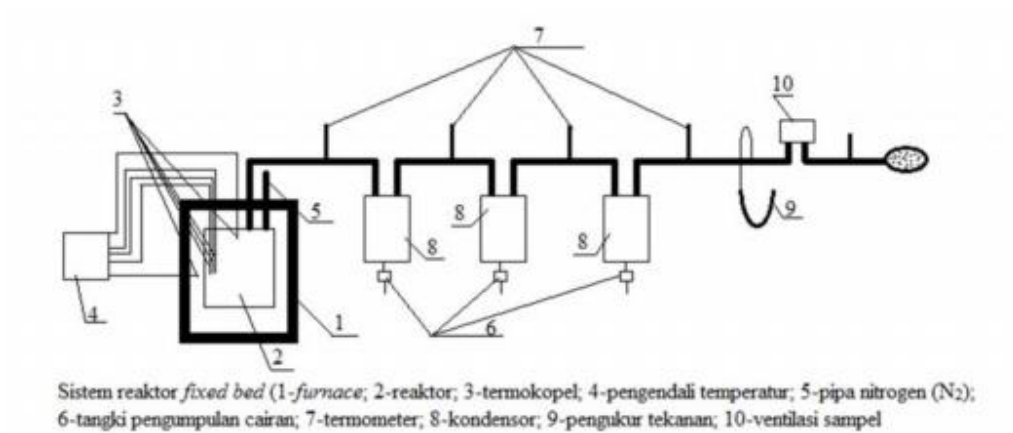
Parameter yang mempengaruhi proses torefaksi diantaranya temperatur, waktu, dan tipe biomassa (Syamsiro, 2016). Suhu torefaksi yang semakin tinggi disertai waktu torefaksi yang semakin lama mampu mengurangi kadar air pada biomassa sehingga mengakibatkan peningkatan daya tahan biomassa, selain itu beberapa kandungan/senyawa yang berpotensi memberikan pengaruh terhadap nilai kualitas biomassa mampu diminimalisir dengan proses penguapan kandungan dan senyawa tersebut saat proses torefaksi berlangsung (Sadaka dan Negi, 2009).

Torefaksi akan memperbaiki sifat-sifat bahan baku dan bahan bakar dari segi nilai kalor, kadar air, sifat higroskopis dan meminimalisir asap pembakaran (Susanty *et al.*, 2016). Proses torefaksi juga merubah biomassa dengan melepaskan zat-zat yang terkandung dalam bahan yang mudah terbakar seperti CO, metana dan bahan yang tidak terbakar seperti karbondioksida untuk memenuhi kebutuhan kalor pada saat proses torefaksi yang menggunakan teknologi reaktor pemanas (Wilen *et al.*, 2013; Koppejan *et al.*, 2012).

Reaktor merupakan suatu alat proses tempat terjadinya reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia maupun nuklir, di dalam reaktor inilah terjadinya reaksi suatu bahan berubah ke bentuk bahan lainnya dengan bantuan energi panas (Fariz, 2017). Studi yang dilakukan Chen *et al.* (2014) menyebutkan bahwa terdapat beberapa teknologi reaktor pemanas pirolisis dan torefaksi, antara lain:

1. Reaktor tipe *fixed bed*, reaktor ini mempunyai karakteristik laju pemanasan (*heating rate*) yang rendah sehingga koefisien perpindahan panas yang terjadi rendah. Reaktor *fixed bed* sering digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang mempengaruhi kadungan produk yang akan ditorefaksi/pirolisis.

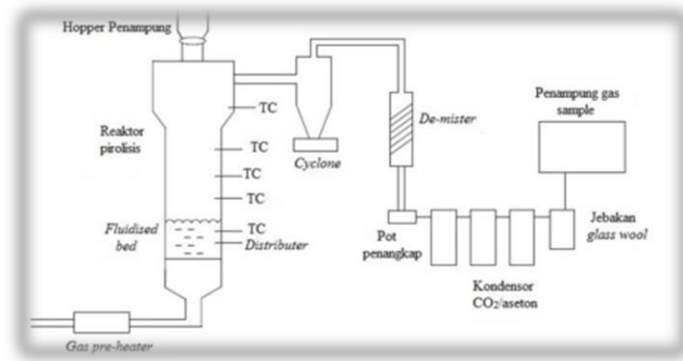
Sketsa dari rektor *fixed bed* dapat dilihat pada Gambar 2.



Sumber: Chen *et al.* (2014).

Gambar 2. Sketsa reaktor *fixed bed*.

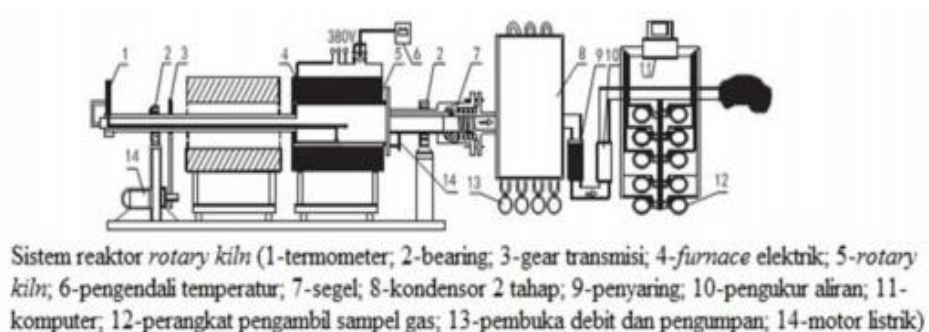
2. Reaktor tipe *fluidized bed* yang bercirikan tingkat pemanasan (*heating rate*) yang tinggi, namun dalam industri tipe ini jarang digunakan. Karena pemisahan material, serta pemanasan dan resirkulasi eksternal yang rumit. Reaktor ini lebih sering digunakan untuk menggambarkan pengaruh temperatur dan waktu tinggal (*residence time*) biomassa dalam reaktor saat proses torefaksi maupun pirolisis berlangsung. Meskipun reaktor *fluidized bed* telah banyak digunakan dalam penelitian laboratorium, namun dalam industri tipe ini jarang digunakan. Karena pemisahan material, serta pemanasan dan resirkulasi eksternal yang rumit. Sketsa dari reaktor *fluidized bed* dapat dilihat pada Gambar 3.



Sumber: Chen *et al.* (2014).

Gambar 3. Skersa reaktor *fluidized bed*

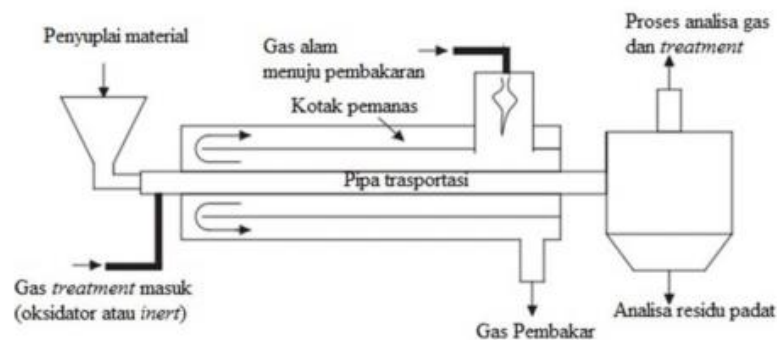
3. Reaktor tipe *rotary kiln* mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dari pada reaktor *fixed bed*. Putaran yang lambat dari tempat pembakaran (*kiln*) memungkinkan pencampuran yang baik dari material dalam reaktor. Reaktor ini mulai banyak digunakan dalam pirolisis/torefaksi secara konvensional. Karena dalam beberapa penelitian tingkat pemanasan (*heating rate*) yang terjadi tidak lebih tinggi dari $100^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dan *residence time* hingga 1 jam, hal ini disebabkan selama proses torefaksi/pirolisis hanya dinding luar yang mengangkut panas dari luar untuk bahan. Gambar sketsa dari reaktor ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Sumber: Chen *et al.* (2014).

Gambar 4. Sketsa reaktor *rotary kiln*.

4. Reaktor tipe *tubular* salah satu jenis reaktor berbentuk tabung dengan dinding tetap dan yang bergerak adalah material di dalam reaktor tersebut. Reaktor *tubular* umumnya dipanaskan dengan sistem panas eksternal, dan dalam beberapa penelitian bahan baku di dalam material bergerak dengan sistem *screw conveyor*, reaktor bujur sangkar yang material digerakan dengan sistem *vibro-fluidiser*, atau tabung dengan *inner mixer*. Ciri khas dari reaktor *tubular* adalah *screw conveyor* reaktor dengan operasional dan biaya konstruksi yang rendah. Desain ini, kecepatan sekrup dapat bervariasi dari 0,5–25 rpm, dengan demikian *residence time* reaktor dapat diubah. Sistem reaktor ini berfungsi untuk termal yang baik dari limbah berbahan plastik dan biomassa. Gambar sketsa dari reaktor *tubular* dapat dilihat pada Gambar 5.



Sumber: Chen *et al.* (2014).

Gambar 5. Sketsa reaktor *tubular*.

2.5 Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)*

Reaktor COMB merupakan teknologi terkait dengan torefaksi secara efisien dipanaskan sehingga mengeringkan biomassa yang tinggi kandungan air. Struktur pengering terdapat elemen-elemen sebagai berikut *burner*, *combustion chamber*,

feeder, cyclone, multy stage dry condenser, ID fan (suction flow), dan control panel. Elemen-elemen ini yang menunjang kerja COMB sebagai reaktor percontohan pertama teknologi torefaksi yang memiliki keunggulan berupa torefaksi secara singkat dengan waktu 3-5 menit dengan kapasitas 20kg/jam. Sebagai pengolahan bioamassa sebagai bahan bakar padat yang mendekati batubara, Sedangkan kelemahan yang terdapat pada teknologi berupa menunggu ± 10 menit agar suhu pada reaktor konstan.

Terdapat beberapa bagian komponen utama teknologi reaktor COMB yaitu:

1. *Burner* berfungsi untuk melakukan pembakaran agar menghasilkan panas, energi panas akan dialirkan ke *column*.
2. *Combustion chamber* merupakan komponen COMB yang berfungsi sebagai ruang pembakaran untuk menghasilkan panas dari proses pembakaran.
3. *Column* terbagi menjadi 3 bagian yaitu *top column, middle column, dan bottom column*. *Column* berfungsi sebagai tempat terjadinya pemanasan biomassa karena adanya tekanan dalamnya.
4. *Feeder* yaitu komponen yang digunakan sebagai umpanan atau masukkan bahan baku biomassa yang kemudian diatur kecepatannya untuk jatuh ke bawah melalui *column* untuk melalui proses pemanasan biomassa.
5. *Cyclone* merupakan saluran pembuangan limbah hasil torefaksi biomassa dalam bentuk debu/abu sisa pemanasan.
6. *Multi stage dry condenser* merupakan komponen aliran air kondensasi yang dihasilkan dari proses pemanasan biomassa.

7. *Induction draft fan (Id Fan)* berfungsi menyalurkan gas panas ke *column* reaktor COMB. Sketsa bagian-bagian komponen utama reaktor COMB dapat dilihat pada Gambar 6.



Sumber: Lee *et al.* (2019).

Gambar 6. Bagian-bagian reaktor *Counter Flow Multi Baffle* (COMB).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian telah dilaksanakan pada Bulan Oktober-Desember 2019, di *Workshop* Teknologi Hasil Hutan dan Laboratorium Teknologi Hasil Hutan (THH) Jurusan Kehutanan, dan Laboratorium Daya dan Mesin Pertanian Jurusan Teknik, Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB), *Electric Furnace* (EF), caliper, cawan proselin, cawan aluminium, *bomb calorimeter*, timbangan elektrik, *tallysheet*, kamera, *scanner general colorimeter*, *aluminium foil*, dan *laptop*. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*), aquades, dan gas elpiji dengan ukuran berat 50 kg.

3.3 Metode Pengambilan Data

3.3.1 Persiapan Bahan

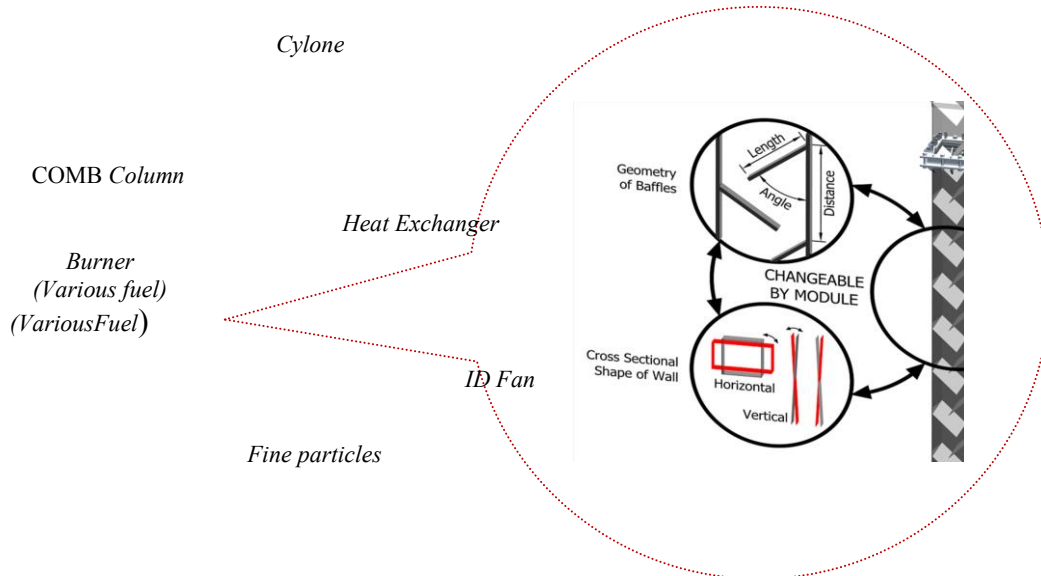
Persiapan awal dilakukan dengan mempersiapkan pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*) yang akan disortir berdasarkan ukuran panjang (25 mm-30 mm) dan

pendek (10 mm-15 mm). Pelet kayu jabon juga akan mengalami proses penyaringan dengan saringan kawat agar pelet terpisah dari kotoran berupa debu serbuk dari pelet.

3.3.2 Proses Torefaksi COMB

- a. *Feeding test* dilakukan untuk mengetahui masa tinggal pelet kayu di dalam *column* COMB dengan melihat waktu jatuh awal pelet sampai waktu akhir pelet terjatuh dan pengaturan frekuensi berbeda yaitu 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, dan 25 Hz, kemudian dilakukan analisis regresi linier sehingga didapatkan hasil *Feeding test* sebesar 17,6 Hz.
- b. Pengoperasian alat COMB
 1. Pengoperasian dilakukan dengan menghidupkan aliran listrik dan memastikan kebutuhan listrik yang teraliri ke alat COMB cukup untuk melakukan torefaksi, jika dirasa cukup maka COMB bisa dihidupkan.
 2. Menyalakan sistem COMB, sebagai pengendali proses torefaksi.
 3. Memeriksa gas dan membuka aliran gas dengan memutar ke kanan, kemudian membuka katup gas dengan memutar ke atas (sampai jarum petunjuk katup menunjukkan angka 3) untuk mengalirkan gas ke *column*.
 4. *Induction Drag fan (ID fan)*, *column*, dan *burner* dinyalakan (sampai terlihat ada api yang menyala dari kaca *burner*).
- c. Torefaksi dilakukan dengan suhu torefaksi mencapai target kisaran 260°C-280°C dengan perbedaan suhu *column in* dan *column top* sebesar $\pm 50^{\circ}\text{C}$ dengan waktu tinggal (*residence time*) 3-5 menit dan *flow rate* (tekanan *column*) sebesar $\pm 4,32$.

- d. Setelah seluruh indikator mencapai target yang ditentukan, pelet kayu jabon dimasukkan ke dalam *feeder* dan *burner* dinyalakan kemudian menutup penutup *feeder* dan memastikan katup *column* bagian bawah telah dibuka (proses torefaksi sedang berlangsung).
- e. Selama proses torefaksi sedang berlangsung, dilakukan pengecekan pada corong asap untuk memastikan bahwa terdapat banyak asap yang dikeluarkan selama proses torefaksi. Banyaknya asap yang dihasilkan dapat mengindikasikan bahwa pelet kayu jabon sedang mengalami proses pemanasan didalam *column*.
- f. Setelah proses torefaksi berakhir, mematikan *burner* dari sistem COMB, kemudian menutup katup pada *column* bagian bawah. Beberapa saat kemudian membuka tempat penampung pelet yang telah melalui proses torefaksi dan melakukan pengecekan untuk memastikan pelet kayu jabon berhasil ditorefaksi.
- g. Mematikan sistem COMB setelah suhu turun sampai $< 100^{\circ}\text{C}$. Sketsa bagian-bagian COMB dapat dilihat pada Gambar 7.



Sumber: Lee *et al.* (2019).

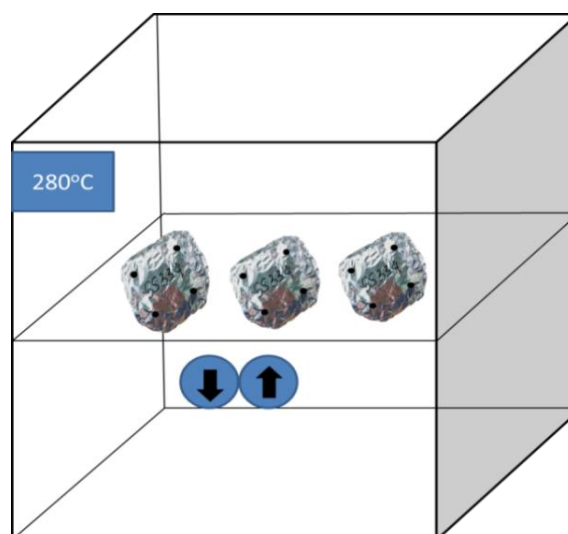
Gambar 7. Sketsa bagian-bagian COMB.

3.3.3 Proses Torefaksi *Electric Furnace* (EF)

1. Menyiapkan sampel pelet kayu jabon yang akan di torefaksi berdasar ukuran sampel panjang dan pendek, dan menyiapkan *aluminium foil* (memotong *aluminium foil* dengan ukuran telah ditentukan) sebagai media wadah tempat sampel pelet yang akan di torefaksi.

2. Memasukkan pelet kayu jabon ke dalam *aluminium foil*, lalu menutup *aluminium foil* agar meminimalisir oksigen yang masuk ke dalam *aluminium foil*, yang menyebabkan terbakarnya pelet saat proses torefaksi.
3. Menghidupkan aliran arus listrik dan menghidupkan *furnace*.
4. Mengatur target suhu yang telah ditentukan, dengan kisaran suhu 260°C - 280°C.
5. Setelah mencapai suhu yang telah ditetapkan masukkan sampel pelet kayu jabon ke dalam *furnace*.
6. Proses torefaksi dengan *furnace* berlangsung menunggu dengan durasi 20 menit.
7. Setelah proses torefaksi selesai, matikan *furnace* agar suhunya turun.
8. Keluarkan sampel dan dikondisikan dalam kondisi ruangan pada suhu 25 °C - 30°C dengan kelembaban relatif (RH) 70%-80%.

Skema proses torefaksi menggunakan *Electric Furnace* (EF) dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Skema torefaksi menggunakan *Electric Furnace* (EF).

3.4 Pengujian Pelet Kayu Jabon

3.4.1 Pengujian perubahan warna

Pengujian perubahan warna pada sampel biomassa dilakukan untuk mengevaluasi perubahan warna akibat perlakuan suhu panas yang tinggi. Pengujian dilakukan secara acak pada sampel pelet kayu jabon sebelum dan sesudah ditorefaksi, dengan pengulangan sebanyak tiga kali, menggunakan alat *scanner general colorimeter* dan di evaluasi perubahan warna menggunakan sistem *CIE-Lab*. Sehingga diperoleh perubahan warna sebagai berikut: (L^*), (a^*), (b^*) dan (ΔE^*). Perubahan nilai warna (ΔE^*) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

Dimana (L^*) menunjukkan kecerahan, (a^*) dan (b^*) masing-masing menunjukkan kromatisasi hijau-merah dan kromatisasi biru-kuning). Nilai (ΔE^*) adalah perubahan warna akibat perlakuan pemanasan. (ΔL^*) adalah perbedaan antara nilai (L^*) awal dan akhir setelah perlakuan, (Δa^*) adalah perbedaan antara nilai (a^*) sebelum dan sesudah torefaksi, dan (Δb^*) yaitu perbedaan antara nilai (b^*) sebelum dan sesudah perlakuan pemanasan. Perubahan warna dapat ditentukan dengan derajat perubahan warna dengan klasifikasi sebagai berikut (Valverde dan Moya, 2014):

$0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$ = perubahan dapat dihiraukan

$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$ = perubahan warna sedikit

$1,5 < \Delta E^* \leq 3$ = perubahan warna nyata

$3 < \Delta E^* \leq 6$ = perubahan warna besar

$6 < \Delta E^* \leq 12$ = perubahan warna sangat besar

$\Delta E^* > 12$ = warna berubah total

3.4.2 Rendemen

Rendemen merupakan salah satu parameter penting untuk mengetahui hasil dari suatu proses kegiatan produksi (Mustafiah *et al.*, 2016). Nilai rendemen dalam penelitian ini adalah perbandingan kehilangan berat pelet kayu jabon sesudah torefaksi dengan pelet kayu jabon sebelum ditorefaksi. Rendemen menggunakan satuan persen. Rumus rendemen adalah sebagai berikut:

$$\text{Rendemen pelet kayu jabon} = \frac{X_1}{X_2} \times 100\%$$

Keterangan:

X1 = Berat pelet kayu jabon sesudah ditorefaksi (g)

X2 = Berat pelet kayu jabon sebelum ditorefaksi (g)

3.4.3 Nilai kalor

Nilai kalor yang diperoleh melalui *bomb calorimeter* menggunakan prosedur standar SNI 8675.2018. Pelet kayu yang akan diuji nilai kalor sebelumnya ditumbuk menggunakan moktar sampai jadi serbuk. Serbuk hasil tumbukan kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 100 °C selama 3 jam. Sampel sebanyak 5 gram dalam kondisi kering tanur yang digunakan dalam uji nilai kalor. Penetapan nilai kalor yang dimaksud untuk mengetahui nilai pembakarannya saat pelet digunakan sebagai bioenergi. Nilai kalor memiliki satuan MJ/kg.

3.4.4 Pengujian Sifat Fisis Pelet Kayu Jabon

3.4.4.1 Kadar Air

Prinsip penetapan kadar air penetapan adalah menguapkan bagian air bebas yang terdapat di dalam bahan sampai terjadi keseimbangan antara kadar air bahan dengan udara sekitar dengan menggunakan energi panas. Sampel dimasukkan ke dalam cawan porselin yang bobot awalnya sudah diketahui. Pelet dikeringkan dalam oven suhu 100°C selama 24 jam, kemudian didinginkan dalam desikator selama 1 jam dan ditimbang bobot akhirnya. Kadar air dihitung menggunakan persamaan standar (SNI 8021.2014):

$$KA = \frac{(BA-BKT)}{BKT} \times 100\%$$

Keterangan:

KA = Kadar air pelet (%)

BA = Bobot awal pelet (g)

BKT = Bobot kering tanur pelet (g)

3.4.4.2 Kerapatan

Kerapatan pada umumnya dinyatakan dalam perbandingan berat dan volume, yaitu dengan cara menimbang dan mengukur volume pelet dalam keadaan kering udara. Kerapatan pelet dihitung dengan menggunakan standar (SNI 01-6235-2000), dengan rumus persamaan kerapatan:

$$KR = \frac{m}{v}$$

Keterangan:

KR = Kerapatan pelet (g/cm^3)

m = Bobot pelet (g)

V = Volume pelet (cm^3)

3.4.4.3 Ketahanan terhadap air

Perlakuan perendaman air yaitu dengan memperlakukan pelet kayu jabon yang direndam dalam air dengan rentan waktu yang berbeda yaitu 1 menit, 5 menit, 30 menit, 1 jam, 6 jam, 12 jam dan 24 jam. Perlakuan ini dilakukan untuk melihat perubahan visual pada pelet kayu jabon sebelum dan setelah ditorefaksi.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Simpulan yang didapat dari penelitian ini adalah.

1. Torefaksi dengan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)* dan *Electric Furnace (EF)* pada suhu 280°C menyebabkan perubahan warna visual pelet berukuran panjang dan pendek semakin gelap dilihat dari nilai (ΔE^*) sebesar >12 .
2. Rendemen *black pellet* kayu jabon berukuran panjang setelah torefaksi dengan reaktor COMB pada suhu 280°C menghasilkan rendemen sebesar 86,59%, dan 83,22% untuk EF. Pelet berukuran pendek torefaksi suhu tinggi 280°C reaktor COMB menghasilkan nilai rendemen sebesar 74,35% dan 73,81% untuk EF.
3. Nilai kalor awal pelet panjang dan pendek sebesar 17,69 MJ/kg. Setelah ditorefaksi suhu tinggi 280°C reaktor COMB nilai kalor meningkat menjadi 31,79 MJ/kg untuk pelet berukuran panjang dan 32,02 MJ/kg untuk pelet pendek, sedangkan torefaksi EF suhu 280°C menghasilkan nilai kalor 19,74 MJ/kg untuk pelet berukuran panjang dan 19,99 MJ/kg untuk pelet kecil. Berdasarkan standar mutu di berbagai negara *black pellet* kayu jabon memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dari standar mutu negara Austria, Jerman, Swedia, dan Korea Selatan dengan kisaran 17-19 MJ/kg.

4. Kadar air awal pelet panjang dan pendek 12,41% dan 12,33%. Setelah ditorefaksi dengan reaktor COMB pada suhu 280°C menurun menjadi 2,85% dan 2,61%, sedangkan torefaksi dengan EF pada suhu 280°C menurunkan kadar air hingga 2,77% dan 2,58%. Kerapatan awal pelet panjang dan pendek 1,05 g/cm³ dan 0,97 g/cm³. Setelah ditorefaksi dengan COMB pada suhu 280°C menurun menjadi 0,91 g/cm³ dan 0,76 g/cm³, sedangkan setelah torefaksi dengan EF pada suhu 280°C menjadi 0,87 g/cm³ dan 0,75 g/cm³. Pelet kontrol hancur sepenuhnya setelah 30 menit uji rendam, sedangkan *black pellet* hasil torefaksi tidak menunjukkan disintegrasi yang signifikan bahkan setelah 24 jam.
5. Perlakuan terbaik torefaksi dari penelitian ini yaitu menggunakan reaktor COMB suhu 280°C pelet berukuran panjang. Dilihat dari hasil nilai kalor yang sangat tinggi dengan proses torefaksi singkat, namun nilai rendemen atau *mass yield* hasil produksi tidak terlalu turun.

5.2 Saran

Nilai kalor *black pellet* kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*) terutama hasil torefaksi dari reaktor COMB bisa memberikan peningkatan besar dalam sifat bioenergi pelet kayu yang berasal dari jenis tumbuhan cepat tumbuh. Sebab itu perlu pengembangan yang lebih lanjut sehingga keberadaan tanaman cepat tumbuh yang banyak ditanam di hutan rakyat maupun hutan produksi dapat memasok kebutuhan sumber energi terbarukan untuk penghemat penggunaan energi fosil. Perlunya kajian lebih mendalam tentang penggunaan energi yang dibutuhkan untuk torefaksi jenis biomassa hasil hutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A., Paidoman, R., Coniwanti, P. 2013. Pengaruh variabel waktu dan temperatur terhadap pembuatan asap cair dari limbah kayu pelawan (*Cyanometra cauliflora*). *Jurnal Teknik Kimia*. 19(1): 1-8.
- Aripin, P. 2013. *Pengaruh Torefaksi terhadap Sifat Fisik Pellet Biomassa yang Dibuat dari Bahan Baku Bagas Tebu*. Skripsi. Universitas Indonesia. Jakarta. 93 hlm.
- Armansyah. 2010. Pemanfaatan biomassa kayu sebagai sumber energi terbarukan. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 2(1): 42– 48.
- Arsad, E. 2014. Sifat fisik dan kimia *wood pellet* dari limbah industri perkayuan sebagai sumber energi alternatif. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 6 (1):1-8.
- Azhar, Rustamaji, H. 2009. Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 3(2): 26-29.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). 2017. *Outlook Energi Indonesia 2017*. Buku. Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Energi BPPT. Jakarta. 93 hlm.
- Badan Standar Nasional Indonesia. 2018. *Pelet Biomassa untuk Energi. SNI 8675-2018*. Buku. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta. 11 hlm.
- Badan Standardisasi Nasional. 2000. *Briket Arang Kayu. SNI 01-6235-2000*. Buku. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta. 16 hlm.
- Badan Standardisasi Nasional. 2014. *Pelet Kayu. SNI 8021: 2014*. Buku. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta. 8 hlm.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Buku. Academic Press Elsevier. Kidlington. 364 hlm.
- Berndes, G., Hoogwijk, M., Broek, R.V.D. 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply. *Journal of Biomass and Bioenergy*. 25(1): 1-28.

- Bhattacharya, S.C., Leon, M.A., Rahman, M.M. 1996. A study on improved biomass briquetting. *Proceedings of the International Conference on Biomass-based Fuels and Cooking Systems (BFCS 2000). Energy Program, School Environment, Resources and Development*. 6(2): 67-71.
- Cahyono, T.D., Coto, Z., Febrianto, F. 2008. Analisis nilai kalor dan kelayakan ekonomis kayu sebagai bahan bakar substitusi batu bara di pabrik semen. *Forum Pascasarjana*. 31(2): 105-116.
- Calle, F., Rosillo, P., Groot, S.L., Hemstock, Wood. 2007. *The Biomass Assessment Bioenergy for a Sustainable Environment*. Buku. Earthscan. London. 269 hlm.
- Chen, Dezhen., Lijie, Yin., Huan, Wang., Pinjing, He. 2014. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*. 34(12): 2466-2486.
- Dinas Kehutanan Provinsi Lampung. 2017. *Kegiatan Agroforestri dan Hutan Rakyat Eksisting Tahun 2016-2017*. Buku. Dinas Kehutanan Provinsi Lampung. Bandar Lampung. 55 hlm.
- Emil, N. 2013. *Analisis Kimia dan Dimensi Serat Kayu Jabon*. Skripsi. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 79 hlm.
- Fantozzi, S., Buratti, C. 2009. Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice using data measured on a real plant. *Journal Biomass Energy*. 34(12): 1796-1804.
- Fariz, M. 2017. *Perancangan dan Simulasi Termal Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular untuk Produksi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota*. Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung. 66 hlm.
- Grover, P.D., Mishra, S.K. 1996. *Biomass briquetting: Technology and Practices*. Buku. Regional Wood Energy Development Programme in Asia FAO. Bangkok. 161 hlm.
- Gultom, R.N., Sulaeman, R., Budiani, E.S. 2017. Pemanfaatan limbah kayu jabon dan limbah serat sawit sebagai bahan baku briket arang. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Pertanian Universitas Riau*. 4(1): 1-5.
- Hastuti, N., Efiyanti, L., Pari, G., Saepuloh, Setiawan, D. 2017. Komponen kimia dan potensi penggunaan lima jenis kayu kurang dikenal asal Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 35(1): 15-17.
- Hidayat, W., Febrianto, F. 2018b. *Teknologi Modifikasi Kayu Ramah Lingkungan: Modifikasi Panas dan Pengaruhnya terhadap Sifat-Sifat Kayu*. Buku. Pusaka Media. Bandar Lampung. 128 hlm.

- Hidayat, W., Febrianto, F., Purusatama, B.D., Kim, N.H. 2018a. Effects of heat treatment on the color change and dimensional stability of *Gmelina arborea* and *Melia azedarach* woods. in: E3S Web of Conferences 03010.
- Hidayat, W., Jang, J.H., Park, S.H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2015. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) wood. *Bioresources*. 10(4): 6961–6974.
- Hidayat, W., Kim, Y.K., Jeon, W.S., Lee, J.A., Kim, A.R., Park, S.H., Maail, R. S., and Kim, N.H. 2017c. Qualitative and quantitative anatomical characteristics of four tropical wood species from Moluccas, Indonesia. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 45(4): 369–381.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Kim, N.H. 2017b. Effect of mechanical restraint on the properties of heat-treated *Pinus koraiensis* and *Paulownia tomentosa* woods. *Bioresources* 12(4): 7539–7551.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Kim, N.H. 2017d. Effect of mechanical restraint on drying defects reduction in heat-treated okan wood. *Bioresources* 12(4): 7452–7465.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Chae, H.M., Kondo, T., Kim, N.H. 2017a. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*. 62(1): 145–152.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2016. Effect of treatment duration and clamping on the properties of heat-treated okan wood. *Bioresources*. 11(4): 10070–10086.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Park, B.H., Banuwa, I.S., Febrianto, F., Kim, N.H. 2017e. Color change and consumer preferences towards color of heat-treated korean white pine and royal paulownia woods. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 45(2): 213–222.
- Hill, C. 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Process*. Buku. Department of Sustainable Organic Chemistry and Technology. Chicheter. 239 hlm.
- Iryani, D.A., Haryanto, A., Hidayat, W., Amrul, Talambanua, M., Hasanuddin, U., Lee, S.H. 2019. Torrefaction upgrading of palm oil empty fruit bunches biomass pellets for gasification feedstock by using COMB (Counter Flow Multi-Baffle) reactor. *Proceeding of 7th Trend in Agricultural Engineering (TAE) 2019 Prague*. Czech Rep. 17-20 September 2019. 7 hlm.
- Karlinasari, L., Yoresta, F.S., Priadi, T. 2018. Karakteristik perubahan warna dan kekerasan kayu termodifikasi panas pada berbagai suhu dan jenis kayu. *Jurnal Ilmu Teknologi Kayu Tropis*. 16(1): 68-82.

- Kaygusuz, K., Toksoy, D., Bayramoglu, M.M. 2017. Global utilization of wood pellet for residential heating. *Journal Engineering Research and Applied Science*. 6(2): 688-697.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2015. *Renstra Kementerian ESDM Tahun 2015-2019*. Buku. Kementerian ESDM. Jakarta. 107 hlm.
- Kementerian Perdagangan Republik Indonesia. 2014. *Market Brief Kayu Pellet di Korea Selatan*. Buku. ITPC Busan. Busan. 23 hlm.
- Kendry, P. 2002. Energy production from biomass: Overview of biomass. *Journal Bioresource Tecnology*. 83(1): 37-46.
- Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S., Madrali, S. 2012. *Status Overview of Torrefaction Technologies*. Buku. IEA Bioenergy Task 32 report. Canada. 52 hlm.
- Krisnawati, H., Kallo, M., Kannien. M. 2011. *Ekologi, Silvikultur dan Produktivitas Jabon (Anthocephalus cadamba)*. Buku. Cifor. Bogor. 11 hlm.
- Latifah, S., Patana, P., Rahmawaty. 2016. Potensi biomassa permukaan tanah pada jalur hijau di Kota Medan. *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*. 1(1): 70-75.
- Lee, S.H., Yoo, J.H., Yoon, K.D. 2019. Cooperation Projects with UNILA dan Central Lampung Government. *Technical Workshop Lampung Tengah*. 4 April 2019.
- Lestari, R.Y., Prabawa, I.D.G.P., Cahyana, B.T. 2019. Pengaruh kadar air terhadap kualitas pelet kayu dari serbuk gergajian kayu jabon dan ketapang. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 37(1):1-12.
- Mandala, W.W., Ma'rif, S., Cahyono, M.S. 2016. Pengaruh suhu terhadap rendemen dan nilai kalor minyak hasil pirolisis sampah plastik. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*. 1(2): 49-52.
- Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Journal Biomass and Bioenergy*. 30(7): 648 – 654.
- Martawijaya, A., Kartasajuna, I., Mandang, Y.I., Prawira, S.A., Kadir, K. 1989. *Atlas Kayu Indonesia Jilid II*. Buku. Badan Litbang dan Inovasi Kementerian Kehutanan. Bogor. 179 hlm.
- Maryanti, R., Komalasari., Helwani, Z. 2017. Pembuatan bahan bakar padat dari pelepah sawit menggunakan proses torefaksi pada variasi suhu waktu torefaksi. *Jurnal Fakultas Teknik*. 4(1): 1-4.

- Matus, M., Krizan, P., Beniak, J., Soos, L. Effects of initial moisture content on the production and quality properties of solid biofuel. *Acta Polytechnica*. 55(5): 335–341.
- Mulyana, D., Asmarahman, C., Fahmi, I. 2010. *Bertanam Jabon*. Buku. PT Agro Media Pustaka. Jakarta. 106 hlm.
- Mustafiah, M. 2016. Pengaruh suhu terhadap produksi asap cair dan blending limbah biomassa cangkang sawit dengan batubara secara pirolisis. *Journal of Chemical Process Engineering*. 1(1): 1-8.
- Nasrin, A.B., Choo, Y.M., Lim, W.S., Joseph, L., Michael, S., Rohaya, M.H., Astimar, A.A., Loh, S.K. 2011. Briquetting of empty fruit bunch fibre and palm shell as a renewable energy fuel. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 6(6): 446–451.
- Nasution, Z.A., Limbong, H.P. 2017. Pembuatan arang cangkang kelapa sawit dengan proses torefaksi. *Jurnal Industri Hasil perkebunan*. 12(1): 14-20.
- Nurhadin, I. 2018. Kualitas limbah serbuk gergaji untuk arang yang diperoleh dengan metode pirolisis lambat. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Metro*. 7(2):1-8.
- Panwar, V., Prasad, P., Wasewar, K.L. 2011. Biomass residue briquetting and characterization. *Journal of Energy Engineering*. 137(2): 108-114.
- Peraturan Direktur Jenderal Bina Produksi Hutan. 2009. *Nomor p.13/VI-BPPHH/2009. Tentang Kayu Olahan Industri Primer Hasil Hutan Kayu (IPHHK)*. Buku. Departemen kehutanan. Jakarta. 7 hlm.
- Pratama, P., Helwani, Z., Komalasari. 2017. Pembuatan briket pelepah sawit menggunakan proses torefaksi pada variasi tekanan dan penambahan perekat tapioka. *Jurnal Fakultas Teknik*. 4(1): 1-6.
- Qi, Y., Jang, J.H., Hidayat, W., Lee, A.H., Lee, S.H., Chae, H.M., Kim, N.H. 2016b. Carbonization of reaction wood from *Paulownia tomentosa* and *Pinus densiflora* branch woods. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 50(5): 973–987.
- Qi, Y., Yang, C., Hidayat, W., Jang, J.H., Kim, N.H. 2016a. Solid bioenergy properties of *Paulownia tomentosa* grown in Korea. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 44(6): 890–896.
- Rani, I.T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2020. Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian*. 9(1): 63–70.

- Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., Firmansyah, F. 2019. Pengaruh jenis biomassa pada pembakaran pirolisis terhadap karakteristik dan efisiensi bioarang-asap cair yang dihasilkan. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 20(1): 18-27.
- Rosyadi, I., Yusuf, Y., Aswanta., Fadhil, M.A., Haryadi. 2019. Pengaruh peningkatan temperatur terhadap nilai kalor, proksimat dan ultimat pada sampah padat kota. *Jurnal Teknik Mesin Unitirta*. 5(1): 120-126.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Bakri, S. 2019. Karakteristik pelet kayu karet (*Havea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB). *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321-331.
- Sadaka, S., Negi, S. 2009. Improvements of biomass physical and thermomechanical characteristics via torrefaction process. *Journal EPS Energy*. 28(3): 435-440.
- Safitri, E.A. 2020. *Pengaruh Ukuran Bahan Baku terhadap Kinerja Torefaksi Cangkang Sawit*. Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung. 49 hlm.
- Salca, E.A., Kobori, H., Inagaki, T., Kojima, Y., Suzuki, S. 2016. Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers. *Journal Wood Science*. 62(4): 297-304.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., Portero, H. 2011. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*. 92(3): 699–706.
- Shecilia, M., Helwani, Z. 2016. Torefaksi batang sawit: Pengaruh kondisi proses terhadap nilai kalor produk torefaksi. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*. 3(2): 1-4.
- Sudrajat, R., Soleh, S. 1994. *Petunjuk Teknis Pembuatan Arang Aktif*. Buku. Badan Peneliti dan Pengembangan Kehutanan Departemen Kehutanan. Bogor. 49 hlm.
- Sukarta, N.I., Okta, L.P.A.L. 2017. Analisis proksimat pada pelet bahan bakar dari kotoran babi yang dikombinasikan dengan limbah kayu. *Jurnal Sains dan Teknologi*. 6(2): 220-227.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Pengaruh torefaksi dengan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) dan *electric furnace* terhadap pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*. 8(1): 65–76.
- Susanty, W., Helwani, Z., Zulfansyah. 2016. Torefaksi pelepah sawit: Pengaruh kondisi proses terhadap nilai kalor torefaksi. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*. 3(1): 1-6.

- Syamsiro, M. 2016. Peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa dengan proses densifikasi dan torefaksi. *Jurnal Mekanik dan Sistem Termal*. 1(1): 7-13.
- Sylviani, Suryandari, E.Y. 2013. Potensi pengembangan industri pelet kayu sebagai bahan bakar terbarukan. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*. 10(4): 235 – 246.
- Tampubolon, A.P. 2008. Kajian kebijakan energi biomassa kayu bakar. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*. 5(1): 29 – 37.
- Uar, N.I., Tuharea, M.S., Hentihu, N. 2015. Pengaruh sifat fisis kayu jabon. *Jurnal Ilmiah Agribisnis dan Perikanan*. 8(1): 46-52.
- Valverde, J.C., Moya, R. 2014. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* wood with two coating. *Color Research and Application*. 39(5): 519-529.
- Van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., Ptasinski, K.J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels. *Journal Biomass and Bioenergy*. 35(1): 3748-3762.
- Vis, M.W., Berg Van Den, V. 2010. *Harmonization of Biomass Resource Assessments, Volume I: Best Practices and Methods*. Buku. BEE. Freiburg. 220 hlm.
- Werkelin, J., Skrifvars, B., Zevenhoven, M., Holmbom, B., Hupa, M. 2010. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*. 89(2): 481–493.
- Widiyanto, A., Siarudin, M. 2016. Karakteristik sifat fisik kayu jabon (*Anthopahalus cadamba miq*) pada arah longitudinal dan radial. *Jurnal Hutan Tropis*. 4(2): 102-108.
- Wilén, C., Jukola, P., Jarvinen, T., Sipila, K., Verhoeff, F., Kiel, J. 2013.. *Wood Torrefaction-Pilot Tests and Utilisation Prospects*. Buku. Helsinki. 220 hlm.
- Winata, A. 2013. *Karakteristik Biopellet dari Campuran Serbuk Kayu Sengon dengan Arang Sekam Padi sebagai Bahan Bakar Alternatif Terbarukan*. Skripsi. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 75 hlm.

- Windarwari. 2011. Uji kinerja rotary dryer berdasarkan efisiensi termal pengeringan serbuk kayu untuk pembuatan biopellet. *Jurnal Teknik Kimia*. 2(21): 1-8.
- Yokoyama, S.2008. *Panduan untuk Produksi dan Pemanfaatan Biomassa*. Buku. Japan Institute of Energy. Tokyo. 365 hlm.
- Yudha, R.S., Komalasari, Helwani, Z. 2017. Proses desifikasi pelepah sawit menggunakan crude gliresol sebagai filler menjadi bahan bakar padat. *Jurnal Fakultas Teknik*. 4(1): 1-4.