

**PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP SIFAT FISIS *BLACK PELLET*
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS)**

(Skripsi)

Oleh

TRI YULIANTO



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2020**

ABSTRAK

PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP SIFAT FISIS *BLACK PELLET* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS)

Oleh

TRI YULIANTO

Biomassa yang dapat digunakan sebagai bahan bakar salah satunya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Limbah padat TKKS diolah menjadi salah satu sumber alternatif yang ramah lingkungan dengan harga terjangkau yang sering disebut dengan pelet. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui perubahan sifat fisis pelet TKKS melalui torefaksi dengan menggunakan reaktor *counter-flow multi baffle* (COMB) dan *electric furnace* (EF). Metode penelitian yang digunakan untuk peningkatan kualitas biomassa TKKS dengan cara torefaksi. Torefaksi adalah metode pengolahan untuk meningkatkan kualitas biomassa dengan suhu 200-300°C tanpa atau terbatasnya oksigen. Pada penelitian ini torefaksi pelet menggunakan suhu 280°C dengan durasi 5 menit menggunakan alat reaktor COMB dan EF dengan durasi 20 menit. Pengujian pelet TKKS meliputi perubahan warna, kerapatan, kadar air, dan ketahanan terhadap perendaman air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi perubahan warna

setelah dilakukan torefaksi menggunakan COMB dengan nilai perubahan warna (ΔE^*) sebesar 14,86 dan EF 14,97. Adanya penurunan pada kadar air pelet TKKS sebelum torefaksi sebesar 10,34% kemudian setelah ditorefaksi menggunakan reaktor COMB menjadi 7,28% dan EF 7,02%. Kerapatan pelet sebelum torefaksi sebesar 0,60 g/cm³ dan, setelah dilakukan torefaksi menggunakan reaktor COMB menjadi 0,57 g/cm³ dan EF sebesar 0,55 g/cm³. Pelet TKKS yang ditorefaksi lebih tahan terhadap air dibandingkan pelet TKKS yang belum ditorefaksi. Hal ini ditunjukkan pada uji ketahanan pelet TKKS terhadap air, sehingga pada kondisi lembab pelet dapat disimpan dalam jangka waktu yang lama.

Kata kunci: *counter-flow multi baffle* (COMB), *electric furnace* (EF), tandan kosong kelapa sawit, torefaksi.

**PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP SIFAT FISIS *BLACK PELLET*
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS)**

Oleh

TRI YULIANTO

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	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang dan Masalah	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Kerangka Teoritis	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Biomassa	6
2.2. Densifikasi Biomassa	8
2.3. Pelet Biomassa	9
2.4. Keunggulan Pelet Biomassa	11
2.5. Kelapa Sawit.....	12
2.6. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)	13
2.7. Torefaksi.....	14
2.8. Reaktor <i>Counter Flow Multi Baffle</i> (COMB)	17
III. METODE PENELITIAN	20
3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	20
3.2. Alat dan Bahan	20
3.3. Persiapan Bahan dan Perlakuan Pendahuluan	20
3.4. Proses Torefaksi	21
3.5. Pengujian dan Analisis	24
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1. Perubahan Warna	27
4.2. Kadar Air.....	30
4.3. Kerapatan.....	32
4.4. Ketahanan terhadap Air.....	34
V. SIMPULAN DAN SARAN	37
5.1. Simpulan.....	37
5.2. Saran.....	38

DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN	45
Lampiran 1-7	46

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi perubahan warna	25
2. Parameter perubahan warna pelet	28
3. Hasil pengukuran kadar air	31
4. Hasil pengukuran kerapatan	32
5. Ketahanan terhadap air	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Bagan alir kerangka pemikiran	5
2. Reaktor COMB	17
3. Komponen reaktor COMB	19
4. Skema reaktor COMB	23
5. Skema torefaksi menggunakan <i>electric furnace</i>	24
6. Perubahan visual pelet TKKS	30
7. Ketahanan terhadap air	35
8. Ketahanan terhadap air	36
9. Pensortiran pelet TKKS	46
10. Panel bagian dalam COMB	46
11. Panel bagian luar COMB	47
12. Proses torefaksi COMB	47
13. Proses torefaksi <i>electric furnace</i>	48
14. Pengukuran kerapatan pelet	48
15. Penyortiran hasil torefaksi <i>black pellet</i>	49

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Tingkat pemakaian bahan bakar terutama bahan bakar fosil semakin meningkat seiring dengan bertambahnya populasi manusia dan meningkatnya laju industri di berbagai negara. Jika hal ini terjadi secara terus menerus akan menyebabkan terjadinya krisis bahan bakar (Mulyadi *et al.*, 2013). Pada tahun 2035 diperkirakan akan terjadi peningkatan konsumsi tiga besar sumber energi global yakni minyak bumi, batu bara dan gas alam yang sudah memasok sekitar 86% dari kebutuhan energi dunia (Roos, 2012). Hal ini dipicu oleh meningkatnya pertumbuhan penduduk, tingginya biaya eksplorasi dan sulitnya mencari sumber cadangan minyak serta banyaknya tuntutan masyarakat dunia tentang emisi karbon gas buangan (Mahdie *et al.*, 2016). Menipisnya sumber energi minyak bumi mendorong akan pencarian sumber energi alternatif yang terbarukan salah satunya ialah sumber energi dari biomassa (Zam, 2011).

Biomassa didefinisikan sebagai produk organik dari pertanian, perkebunan dan kehutanan yang dikembangkan untuk pasokan makanan, bahan bakar, dan bahan organik dari limbah dan fasilitas pengolahan limbah. Biomassa saat ini merupakan sumber energi terbarukan terbesar secara global dan ekonomi dalam porsi yang signifikan (biasanya 20-40%) dari total konsumsi energi

di negara-negara berkembang (Panwar *et al.*, 2011). Biomassa dapat dihasilkan secara langsung sebagai produk atau limbah dari pengolahan hasil perkebunan atau kehutanan. Biomassa yang melimpah dari limbah perkebunan adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

Perkebunan sawit rakyat mencapai porsi 44% dari total luas perkebunan sawit di Indonesia dan mereka diketahui memiliki produktivitas yang jauh lebih kecil dibandingkan perkebunan sawit besar (Duryat *et al.*, 2013). Pada tahun 2015 luas lahan perkebunan kelapa sawit di Indonesia sekitar 10 juta ha, dengan rincian perkebunan kelapa sawit rakyat sekitar 4 juta ha, perkebunan kelapa sawit milik Badan Usaha Milik Negara (BUMN) 0,7 juta ha dan perkebunan kelapa sawit swasta sekitar 5 juta ha (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2014). Selama ini, TKKS belum dimanfaatkan secara optimal sebagai bahan bakar. Salah satu potensi pemanfaatan limbah TKKS yaitu sebagai sumber bioenergy (Yulianto *et al.*, 2020). Pemanfaatan TKKS sebagai bioenergi dapat dilakukan dengan proses densifikasi, yaitu pemadatan biomassa dengan cara pengempaan/penekanan sehingga rapat massa dan kerapatan potensi energinya meningkat (Syamsiro, 2016). Produk yang dihasilkan dari proses densifikasi salah satunya ialah pelet biomassa. Namun, pelet biomassa memiliki kekurangan diantaranya tidak dapat disimpan lama dan memiliki daya serap air yang tinggi serta nilai kalor yang relatif rendah. Teknologi torefaksi dapat digunakan untuk pengolahan pelet biomassa agar kualitas meningkat dan biomassa dapat dipergunakan dalam rentang waktu lama (Basu, 2013).

Proses torefaksi merupakan proses pemanasan bahan baku biomassa dengan suhu yang terkendali antara 200°C-300°C. Proses torefaksi ini membawa perubahan karakteristik struktur biomassa tersebut menjadi arang yang keras dan ulet (Nur, 2014). Torefaksi dilakukan untuk mengetahui perubahan visual warna pada pelet TKKS dan pengaruh suhu torefaksi terhadap sifat fisis pelet TKKS. Pada penelitian ini, pengolahan pelet TKKS menjadi sumber energi biomassa dilakukan dengan menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) dan *Electric Furnace* (EF). Penelitian ini perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh torefaksi terhadap peningkatan mutu pelet TKKS.

1.2 Tujuan

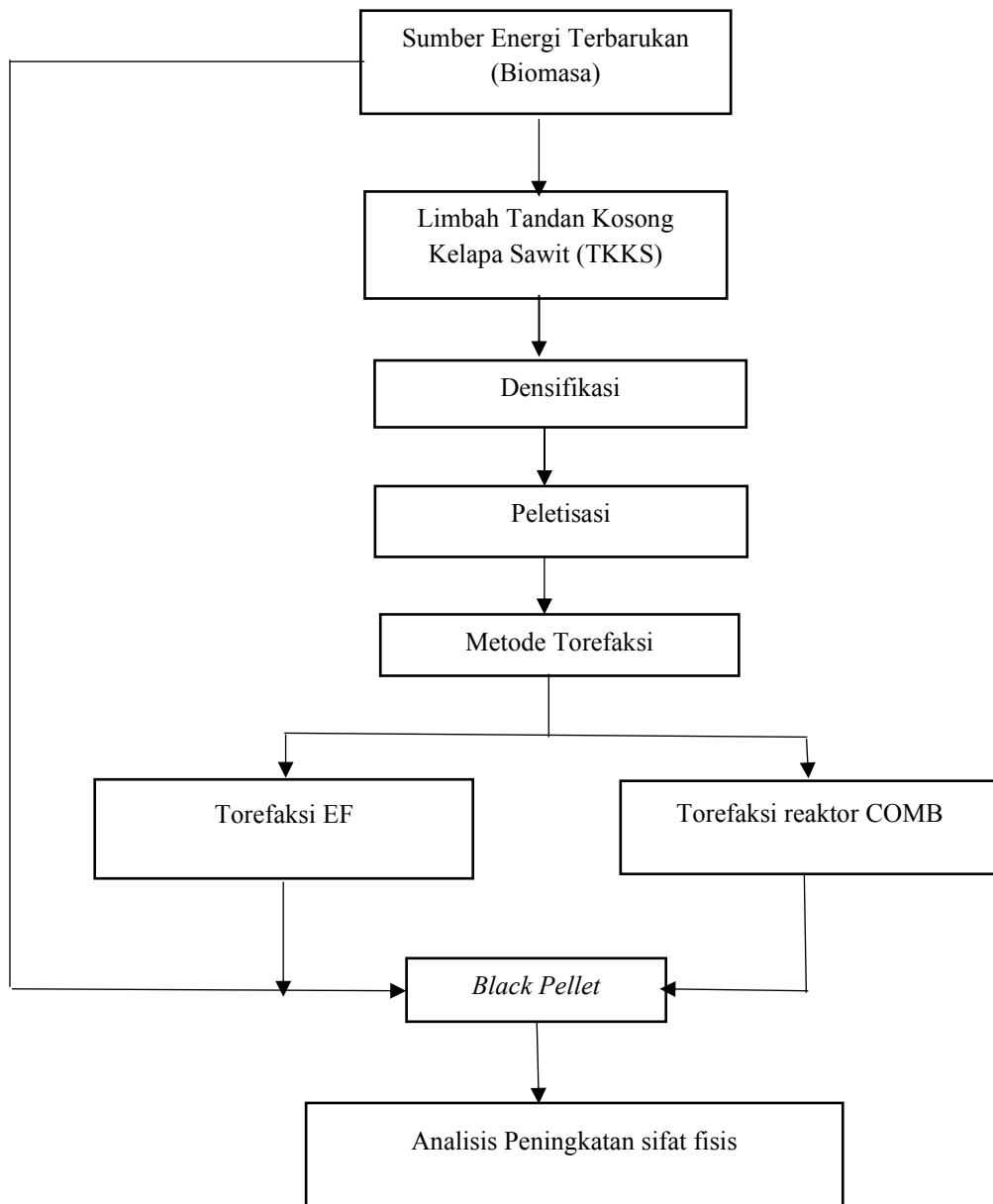
Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh torefaksi dengan reaktor COMB dan EF terhadap warna pelet TKKS.
2. Mengetahui pengaruh torefaksi dengan reaktor COMB dan EF terhadap sifat fisis TKKS.

1.3 Kerangka Pemikiran

Tingkat pemakaian bahan bakar terutama bahan bakar fosil semakin meningkat seiring dengan bertambahnya populasi manusia dan meningkatnya laju industri di berbagai negara. Jika hal ini terjadi secara terus menerus akan menyebabkan terjadinya krisis bahan bakar. Menipisnya sumber energi minyak bumi

mendorong akan pencarian sumber energi alternatif yang terbarukan salah satunya ialah sumber energi dari biomassa. Biomassa dapat dihasilkan secara langsung sebagai produk atau limbah dari pengolahan hasil perkebunan atau kehutanan. Salah satu bentuk pengolahan biomassa dari limbah perkebunan adalah TKKS. Selama ini, TKKS dibiarkan membusuk atau langsung digunakan sebagai bahan bakar, salah satu bentuk pengolahan limbah TKKS yaitu dengan mengkonversikannya melalui metode bioenergi. Produksi bioenergi dapat dilakukan dengan proses densifikasi. Produk yang dihasilkan dari proses densifikasi salah satunya ialah pelet biomassa. Pelet biomassa memiliki kekurangan diantaranya tidak dapat disimpan lama dan memiliki daya serap air yang tinggi serta nilai kalor rendah. Metode torefaksi merupakan salah satu metode untuk pengolahan pelet biomassa agar dapat mengetahui pengaruh suhu terhadap sifat fisis TKKS dan dapat dipergunakan dalam rentang waktu lama. Proses torefaksi dilakukan dengan reaktor COMB dengan suhu 280°C durasi 5 menit dan EF dengan suhu 280°C durasi 20 menit.



Gambar 1. Kerangka pemikiran penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa adalah bagian dari bahan bakar terbarukan termasuk pelet kayu. Pelet kayu dapat digunakan dalam skala industri, baik untuk pembangkit tenaga listrik, sedangkan dalam skala medium dan kecil digunakan untuk pemanas ruangan, bahan bakar boiler, tungku pemasak, dan lain-lain. Keunggulan pelet biomassa selain memiliki kandungan energi sebesar 17 GJ/ton, emisi karbon pelet yang dihasilkan 10 kali lebih rendah dari emisi batu bara dan minyak bumi serta 8 kali lebih rendah dari gas alam (Kementrian Perdagangan Republik Indonesia, 2011).

Sumber energi utama di negara berkembang yang berada dalam bentuk kayu bakar yang digunakan untuk pemanasan dan memasak disebut biomassa. Energi biomassa populer digunakan di negara maju sebagai sumber bahan bakar untuk pembangkit listrik. Negara-negara di Eropa sebagai pengimpor produk pelet di dunia berdasarkan data International Technology Agreement (ITA) 2016, mengeluarkan kebijakan untuk menggunakan energi terbarukan yang mengarah pada penggunaan pelet biomassa (Goetzl, 2015).

Bahan baku utama dari biomassa untuk menghasilkan panas dan pembangkit listrik adalah biomassa dari kayu. Sumber-sumber lainnya termasuk jagung,

kedelai, sisa tanaman, dan rumput. Pelet adalah salah satu jenis sumber energi dari biomassa. Pembakaran pelet dinilai lebih ekonomis dibandingkan batu bara, termasuk dalam pembakaran bersama dengan batu bara dalam pabrik, konversi pembangkit atau pembangkit listrik berbahan biomassa (Qian, 2013).

Biomassa terdiri atas beberapa komponen yaitu kandungan air (*moisture content*), zat mudah menguap (*volatile matter*), karbon terikat (*fixed carbon*), dan abu (*ash*). Parameter penting lainnya dalam biomassa adalah kandungan nilai kalornya. Besarnya nilai kalor sangat tergantung dari komposisi zat-zat di atas. Semakin tinggi kandungan karbon terikat maka nilai kalornya semakin tinggi. Mekanisme pembakaran biomassa terdiri dari tiga tahap yaitu pengeringan (*drying*), devolatilisasi (*devolatilization*), dan pembakaran arang (*char combustion*). Proses pengeringan akan menghilangkan kandungan air, devolatilisasi yang merupakan tahapan pirolisis akan melepaskan zat-zat yang mudah menguap (*volatile matter*), dan pembakaran arang yang merupakan tahapan reaksi antara karbon dan oksigen akan melepaskan kalor. Laju pembakaran arang tergantung pada laju reaksi antara karbon dan oksigen pada permukaan dan laju difusi oksigen pada lapis batas bagian dalam dari arang. Reaksi permukaan terutama membentuk CO, sehingga luar partikel CO akan bereaksi lebih lanjut membentuk CO₂. Pembakaran akan menyisakan material berupa abu (Surono, 2013).

2.2 Densifikasi Biomassa

Usaha peningkatan nilai kalor dilakukan diantaranya dengan densifikasi dan torefaksi. Biomassa pada umumnya mempunyai densitas/massa jenis yang cukup rendah, sehingga akan mengalami kesulitan dalam penanganannya. Densifikasi bertujuan untuk meningkatkan densitas dan menurunkan persoalan penanganan seperti penyimpanan dan pengangkutan. Secara umum densifikasi biomassa mempunyai beberapa keuntungan (Bhattacharya *et al.*, 1996):

1. Menaikkan nilai kalori per unit volume.
2. Mudah disimpan dan diangkut.
3. Mempunyai ukuran dan kualitas yang seragam.

Densifikasi merupakan proses pemadatan biomassa dengan cara pengempaan/penekanan sehingga rapat massa dan kerapatan potensi energinya meningkat (Syamsiro, 2016). Salah satu cara untuk memperbaiki sifat fisik suatu bahan yaitu dengan densifikasi yang bertujuan untuk memadatkan dan meningkatkan kerapatan, sehingga dapat memiliki efisiensi nilai bahan yang tinggi (Abdullah *et al.*, 1998). Proses densifikasi dilakukan pada bahan yang memiliki sifat fisik tidak beraturan atau berbentuk curah.

Tiga tipe proses densifikasi, antara lain : *extruding*, *briquetting*, dan *pelleting*.

Proses *extruding*, bahan ditekan menggunakan sebuah ulir (*screw*) sehingga menghasilkan produk yang kompak dan padat (AET, 2003). Proses *briquetting* menghasilkan produk berbentuk seperti tabung dengan ukuran diameter dan tinggi yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan. Proses *pelleting* terjadi karena adanya

aliran bahan dari *roll* yang berputar disertai dengan tekanan menuju lubang-lubang *dies* (alat pencetak atau pemotong) pencetak biopelet. Peletisasi merupakan proses pengeringan dan pembentukan biomassa dengan menggunakan tekanan tinggi untuk menghasilkan biomassa padat berbentuk silinder dengan diameter maksimum 25 mm. Proses peletisasi bertujuan untuk menghasilkan bahan bakar biomassa dengan volume yang secara signifikan lebih kecil dan densitas energi lebih tinggi, sehingga lebih efisien untuk proses penyimpanan, transportasi, dan konversi ke dalam bentuk energi listrik atau energi kimia lainnya (AET, 2003).

2.3 Pelet Biomassa

Sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dapat diperoleh dari berbagai limbah biomassa dan salah satunya adalah limbah industri pengolahan kayu berupa serbuk kayu. Limbah serbuk kayu merbau dan matoa ternyata memiliki nilai kalor awal yang cukup tinggi (nilai kalor serbuk kayu merbau 4.309,60 kalori/gram dan nilai kalor serbuk kayu matoa 4.125,60 kalori/gram), hal ini sangat potensial untuk dijadikan sebagai bahan bakar alternatif. Pelet adalah salah satu bahan bakar biomassa yang mendapat perhatian nasional dengan adanya kenaikan harga bahan bakar fosil. Bahan baku pelet berupa limbah eksploitasi seperti sisa penebangan, cabang, ranting, limbah industri perkayuan seperti sisa potongan, serbuk gergaji, kulit kayu, limbah sawit dan limbah pertanian seperti jerami dan sekam (Hill, 2006).

Aglomerat yang diproduksi secara langsung dengan penambahan perekat dalam jumlah yang tidak melebihi 3% dari beratnya, berbentuk silinder dengan diameter tidak lebih dari 25 mm dan panjang tidak lebih dari 100 mm dan dilaporkan dalam satuan metrik ton merupakan pengertian pelet (Hanun, 2014).

Serpihan kayu atau sisa-sisa hasil produksi kayu yang berdiameter 6-8 mm dan berukuran panjang 10-30 mm, dan sudah kering. Serpihan kayu ini kemudian mengalami proses lanjut tanpa campuran kimia, ditekan dengan tekanan kuat menggunakan mesin khusus. Pelet menghasilkan panas kurang lebih 4,9 kWh/kg karena memiliki kadar air yang rendah (8-10%), kadar abu (0,5-1%) dengan kerapatan 650 kg/m³. Satu kilogram pelet biomassa menghasilkan panas yang sama dengan yang dihasilkan oleh setengah liter minyak (Leaver, 2008).

Pelet biomassa memiliki fungsi sebagai pengganti bahan bakar fosil, yaitu untuk pembangkit tenaga listrik ramah lingkungan dan pemanas ruangan. Proses pembuatan pelet biomassa terdiri dari penerimaan bahan baku, *screening*, *grinding*, *drying*, *pelletizing*, *cooling*, penyaringan, standarisasi, dan pengemasan (USDA, 2012). Pelet yang berbentuk silinder dapat digunakan sebagai bahan bakar kebutuhan rumah tangga, pertanian, dan industri besar. Pelet biomassa adalah salah satu sumber energi alternatif dan ketersediaan bahan bakunya sangat mudah ditemukan. Bahan baku pelet biomassa berupa limbah eksploitasi seperti sisa penebangan, cabang dan ranting, limbah industri perkayuan seperti sisa potongan, serbuk gergaji dan kulit kayu, limbah pertanian seperti jerami dan limbah sawit seperti TKKS. Salah satu proses pengolahan biomassa seperti limbah kayu ialah dengan cara pemeletan, yaitu proses untuk menekan bahan

menjadi bentuk pelet. Bahan bakar padat ini sering disebut dengan pelet biomassa atau biopelet, yang merupakan bahan bakar biomassa berbentuk pelet dan memiliki keseragaman ukuran, bentuk, kelembaban, densitas serta kandungan energi (Mani, 2004).

2.4 Keunggulan Pelet Biomassa

Pelet memiliki karakteristik yang berbeda-beda tergantung pada bahan pembuatannya, kebanyakan pembuatan pelet untuk bahan bakar menggunakan zat organik atau biomassa seperti bungkil jarak, sekam, dan serbuk kayu.

Keunggulan utama pemakaian bahan bakar pelet biomassa adalah penggunaan kembali bahan limbah seperti serbuk kayu yang biasanya dibuang begitu saja. Serbuk kayu yang terbuang begitu saja dapat teroksidasi dibawah kondisi yang tak terkendali akan membentuk gas metana atau gas rumah kaca (Cook, 2007).

Pelet memiliki konsistensi dan efisiensi bakar yang dapat menghasilkan emisi yang lebih rendah dari kayu. Bahan bakar pelet menghasilkan emisi bahan partikulat yang paling rendah dibandingkan jenis lainnya. Sulfur, dan gas karbon dioksida merupakan sedikit polutan air dan udara yang dihasilkan oleh penggunaan minyak sebagai bahan bakar (Azhar dan Rustamaji, 2009). Sistem pemanasan dengan pelet menghasilkan emisi CO₂ yang rendah, karena jumlah CO₂ yang dikeluarkan selama pembakaran setara dengan CO₂ yang diserap tanaman ketika tumbuh, sehingga tidak membahayakan lingkungan. Dengan efisiensi bakar yang tinggi, jenis emisi lain seperti NO_x dan bahan organik yang

mudah menguap juga dapat diturunkan. Adapun keunggulan pelet dibandingkan dengan bahan bakar lainnya adalah sebagai berikut :

1. Lebih mudah dalam pembuatannya,
2. Biaya proses lebih murah,
3. Tidak berisiko meledak,
4. Sumber bahan baku biomassa jumlahnya melimpah.

2.5 Kelapa Sawit

Tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) berasal dari Nigeria, Afrika Barat. Meskipun demikian, ada yang menyatakan bahwa kelapa sawit berasal dari Amerika Selatan yaitu Brazil karena lebih banyak ditemukan spesies kelapa sawit di hutan Brazil dibandingkan Afrika. Pada kenyataannya, tanaman kelapa sawit hidup subur di luar daerah asalnya, seperti Malaysia, Indonesia, Thailand, dan Papua Nugini. Tanaman kelapa sawit memiliki arti penting bagi pembangunan perkebunan nasional. Selain mampu menciptakan kesempatan kerja dan mengarah kepada kesejahteraan masyarakat, kelapa sawit juga sumber devisa negara dan Indonesia merupakan salah satu produsen utama minyak kelapa sawit (Fauzi *et al.*, 2008).

Luas areal perkebunan kelapa sawit di Indonesia dari tahun ke tahun mengalami peningkatan yang cukup berarti. Tahun 2002 luasnya 4 juta ha, meningkat menjadi 5 juta ha pada tahun 2003 (pertumbuhan 27,26%). Tahun 2004 luasnya 5,6 juta ha (pertumbuhan 6,9%) dan sampai bulan Oktober 2007 luas lahan kelapa

sawit di Indonesia telah mencapai 6,3 juta ha. Riau menduduki posisi pertama dengan luas lahan 1,4 juta ha, disusul Sumatera Utara dengan luas lahan 1 juta ha dan Sumatera Selatan dengan luas lahan 606 ha (Sunarko, 2009).

Tanaman kelapa sawit merupakan salah satu komoditi perkebunan yang memiliki nilai jual yang cukup tinggi dan penyumbang devisa terbesar bagi negara Indonesia dibandingkan dengan komoditi perkebunan lainnya. Setiap tanaman memiliki morfologi yang berbeda-beda cirinya dan fungsinya yang dijual.

Tanaman kelapa sawit secara morfologi terdiri atas bagian vegetatif (akar, batang, daun) dan bagian generatif (bunga dan buah) (Sunarko, 2007).

Kelapa sawit tergolong tanaman kuat, walaupun tanaman ini tidak luput dari serangan hama dan penyakit, baik yang kurang maupun yang membahayakan. Sebagian besar hama yang menyerang adalah golongan insekta atau serangga. Tetapi ada beberapa jenis hewan dari kelompok mamalia yang bisa menyebabkan kerugian tidak sedikit pada perkebunan kelapa sawit. Sedangkan penyakit yang menyerang kelapa sawit, disebabkan oleh beberapa mikroorganisme antara lain jamur, bakteri, dan virus (Aripin, 2013; Sunarko, 2009).

2.6 Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) merupakan limbah utama berlignoselulosa yang belum dimanfaatkan secara optimal dari industri pengolahan sawit dan merupakan limbah padat terbesar yang dihasilkan oleh perkebunan kelapa sawit (PKS). Setiap pengolahan 1 ton tandan buah segar (TBS) dihasilkan TKKS

sebanyak 22–23% TKKS atau sebanyak 220–230 kg/ton TKKS. Jumlah limbah TKKS seluruh Indonesia pada tahun 2004 diperkirakan mencapai 18,2 juta ton (Sunarwan dan Juhana, 2013).

TKKS merupakan salah satu limbah industri minyak sawit yang mengandung serat yang cukup banyak dan sampai saat ini belum dimanfaatkan secara optimal. Selama ini TKKS yang tidak tertangani menyebabkan bau busuk, dan menjadi tempat bersarangnya serangga (Irawan *et al.*, 2015). Kandungan lignoselulosa dalam limbah TKKS sangat berpotensi untuk dimanfaatkan menjadi produk bahan bakar padat. Menurut Aripin (2005), menyatakan untuk mendapatkan energi maka sampah harus mempunyai kalor atau nilai panas yang tinggi. Beberapa penelitian dalam pembuatan bahan bakar padat telah dilakukan, diantaranya pembuatan bahan bakar padat dari biomassa kayu karet dengan proses torefaksi dan variasi waktu reaksi yaitu 30, 45, dan 60 menit, dan suhu 225, 250, 275 dan 300°C.

2.7 Torefaksi

Torefaksi adalah proses pengolahan secara termokimia untuk bahan baku yang mengandung karbon seperti biomassa TKKS. Torefaksi berlangsung pada tekanan atmosfer dengan rentang suhu 200-300°C (Bergman, 2005). Temperatur terakhir dari torefaksi akan meningkat dan menyebabkan terjadinya penambahan gas volatil dari hasil dekomposisi hemiselulosa, lignin, dan selulosa (Chen dan Kuo, 2011). Perlakuan panas pada suhu tinggi mampu menurunkan hemiselulosa dan melunakkan lignin, yang menyebabkan pengurangan massa (Hidayat *et al.*, 2015;

Hidayat *et al.*, 2016; Hidayat dan Febrianto, 2018). Hemiselulosa akan terdekomposisi terlebih dahulu dan dilanjutkan dengan dekomposisi lignin dan selulosa (Chen dan Kuo, 2010). Torefaksi digunakan sebagai langkah pengkondisian awal untuk metode konservasi biomassa seperti gasifikasi. Perlakuan panas yang dilakukan tidak hanya mengubah struktur serat tetapi juga kualitas dari biomassa, metode tersebut merupakan alternatif perawatan ramah lingkungan yang menarik untuk menambah kualitas fisik dan kimia sebagai produk bernilai tambah (Hidayat *et al.*, 2017).

Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Makin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun. Penelitian torefaksi pada biomassa kelapa sawit telah dilakukan pada kulit buah kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit dan kulit keras yang membungkus biji kelapa sawit (*kernel shell*). Pada penelitian tersebut, *yield* (angka banding/rendemen) energi paling besar dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit sekitar 96% dan *kernel shell* 100%, sedangkan pada kulit kelapa sawit *yield* energi sebesar 56%. Keberadaan oksigen berpengaruh terhadap kenaikan temperatur tetapi massa dan energi *yield* menurun dengan menaikkan konsentrasi oksigen. Pada suhu tinggi maka dekomposisi hemiselulosa lebih cepat terjadi sehingga massa dari komponen-komponen mudah terbakar yang terdapat di kelapa sawit ikut terbawa dalam proses torefaksi temperatur tinggi (Chen, 2011). Torefaksi dapat dilakukan pada berbagai macam biomassa seperti jerami, kayu, bambu. Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik

biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Makin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun (Chen *et al.*, 2015).

Penelitian torefaksi pada biomassa kelapa sawit telah dilakukan pada kulit buah kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit dan kulit keras yang membungkus biji kelapa sawit (*kernel shell*) (Uemura *et al.*, 2011). Pada penelitian tersebut, *yield* energi paling besar dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit sekitar 96% dan *kernel shell* 100%, sedangkan pada kulit kelapa sawit *yield* energi sebesar 56%. Keberadaan oksigen berpengaruh terhadap kenaikan temperatur tetapi massa dan *yield* menurun dengan menaikkan konsentrasi oksigen. Pada temperatur tinggi maka dekomposisi hemiselulosa lebih cepat terjadi sehingga massa dari komponen-komponen mudah terbakar yang terdapat di kelapa sawit ikut terbawa dalam proses torefaksi temperatur tinggi (Chen dan Kuo, 2011). Hasil penelitian torefaksi TKKS pada temperatur 200°C dan 225°C tidak terjadi degradasi dari hemiselulosa, namun pada temperatur 250°C penurunan berat mencapai 19,5% berat sampel, penurunan berat dari degradasi hemiselulosa pada 275°C sekitar 52,5% dan pada 300°C hanya sekitar 16,8% berat, hal ini karena penurunan berat yang tinggi pada temperatur sebelumnya. Penelitian tentang torefaksi untuk biomassa berserat seperti TKKS memperlihatkan bahwa keberadaan oksigen akan mengurangi perolehan produk yang dihasilkan akibat cepatnya proses oksidasi terhadap komponen-komponen mudah terbakar yang terdapat di biomassa (Lu *et al.*, 2012).

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

Reaktor *Counter-flow multi baffle* (COMB) merupakan alat teknologi terkait dengan torefaksi secara efisien mengeringkan biomassa yang tinggi kandungan air. Struktur pengering terdapat elemen-elemen sebagai berikut *burner*, *combustion chamber*, *feeder*, *cyclone*, *multy stage dry condenser*, *Induced Draft (ID) fan (suction flow)*, dan *control panel*. Elemen-elemen ini yang menunjang kerja COMB sebagai reaktor percontohan pertama teknologi torefaksi secara singkat dengan waktu 3-5 menit dengan kapasitas 20 kg/jam sebagai pengolahan biomasa bahan bakar padat yang mendekati batubara. reaktor COMB dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Reaktor COMB

Terdapat beberapa komponen utama COMB yaitu:

1. *Burner* digunakan 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 pembakaran biomassa karena adanya tekanan dalamnya.
4. *Feeder* merupakan komponen yang digunakan sebagai umpanan atau masukkan bahan baku biomassa yang kemudian diatur kecepatannya untuk jatuh ke bawah melalui *column* melalui proses pembakaran biomassa.
5. *Cyclone* merupakan saluran pembuangan limbah hasil torefaksi biomassa dalam bentuk debu.
6. *Multi stage dry condenser* merupakan komponen aliran air kondensasi yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa.
7. *Induced Draft Fan (ID Fan)* sebagai pengatur masuknya udara di dalam *column* COMB.

Komponen utama COMB dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Komponen reaktor COMB

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli-Desember 2019 di *Workshop* Laboratorium Teknologi Hasil Hutan (THH) Lapang Terpadu dan Teknologi Hasil Hutan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: reaktor *counter-flow multi baffle* (COMB), oven, caliper, timbangan elektrik, *tallysheet*, *camera*, dan laptop. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah, *aluminium foil*, pelet tandan kosong kelapa sawit yang diperoleh dari kota Medan dan *Microsoft Excel 2010*.

3.3 Persiapan Bahan dan Perlakuan Pendahuluan

3.3.1 Penyaringan

Pelet TKKS yang telah disiapkan lalu dilakukan tahap pertama yaitu penyaringan menggunakan saringan (*strainer*) dengan tujuan memisahkan pelet TKKS dengan debu dan serbuk sisa pelet.

3.3.2 Penyortiran

Pelet TKKS dipilih melalui tahap sortimen dimana pelet TKKS dipisahkan ukuran sampel sebesar 1-2 cm. Lalu dilakukan tahap pengukuran dengan cara menimbang berat masing-masing pelet pada kondisi kering udara dan kering tanur. Sampel pelet TKKS kemudian di simpan dengan menggunakan kontainer plastik untuk menjaga pelet dari kelembaban udara.

3.3.3 Feeding Test

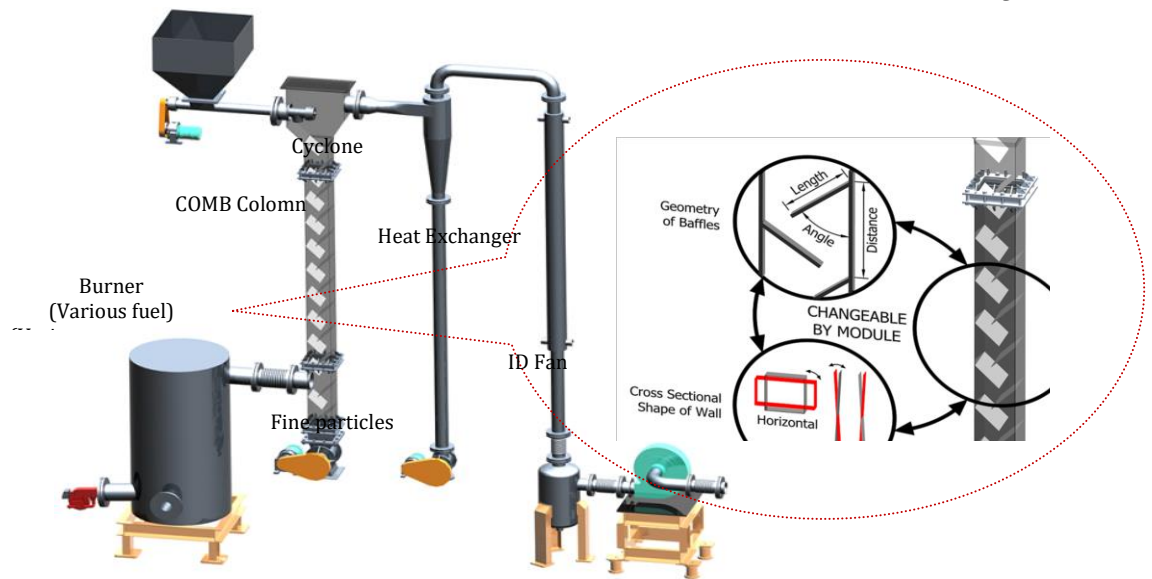
Feeding test dilakukan untuk menentukan frekuensi laju pengumpan (*feeding rate*) pelet TKKS di dalam *column* COMB dengan pengaturan frekuensi berbeda yaitu 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, dan 25 Hz. Kemudian dilakukan regresi linier sehingga didapatkan hasil *feeding test* sebesar 17,6 Hz.

3.4 Proses Torefaksi

3.4.1 Proses Torefaksi menggunakan COMB

1. Torefaksi menggunakan reaktor COMB dilakukan dengan menentukan target suhu torefaksi sebesar 280°C, menentukan masa tinggal (*Residence time*) selama 3 sampai 5 menit dan mengatur *flow rate* (tekanan *column*) sebesar 4,76 cm³/menit dengan perbedaan suhu *column in* dan *column top* sebesar ±50°C
2. Proses tersebut berlaku untuk tiap jenis pelet biomassa.

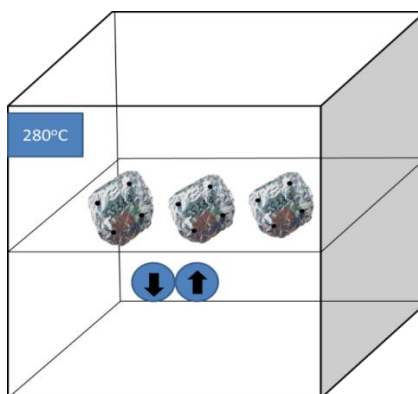
3. Setelah seluruh indikator torefaksi tercapai, pelet biomassa TKKS yang telah melalui tahap penyaringan dan penyortiran dimasukkan ke dalam *feeder*, lalu *fuel feeder* dinyalakan dan tutup penutup *feeder*. Pastikan katup *column* bagian bawah telah dibuka dimana proses torefaksi sedang berlangsung.
4. 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 biomassa sedang mengalami proses pembakaran di dalam *column*.
5. Setelah proses torefaksi berakhir, mematikan *burner* dari reaktor COMB. Kemudian menutup katup pada *column* bagian bawah dan membuka tempat penampung pelet biomassa yang telah melalui proses torefaksi. Lakukan pengecekan untuk memastikan pelet biomassa TKKS telah berhasil tertorefaksi. Skema reaktor COMB dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema reaktor COMB.

3.4.2. Torefaksi menggunakan *Electric Furnace* (EF)

Torefaksi menggunakan EF dilakukan dengan menentukan target suhu torefaksi sebesar 280°C dan waktu tinggal (*residence time*) selama 20 menit. Pelet TKKS yang telah disiapkan kemudian ditimbang dengan menggunakan timbangan digital sebesar 5 gram, kemudian pelet TKKS dibungkus dengan *aluminium foil* dan beri lubang di bagian sisinya. Setelah target suhu torefaksi tercapai, lalu masukan sampel pelet TKKS kedalam EF dan lakukan pengamatan pada suhu dan waktu yang ditentukan. Setelah tercapai waktu 20 menit keluarkan sampel dan dikondisikan dalam kondisi ruangan pada suhu $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$ dengan kelembaban relatif (RH) 70-80%. Skema proses torefaksi menggunakan EF dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema torefaksi menggunakan EF.

3.5 Pengujian dan Analisis

3.5.1 Perubahan Warna

Pengujian warna dan sifat fisis dilakukan terhadap pelet TKKS sebelum dan setelah ditorefaksi. Evaluasi perubahan warna dilakukan dengan menggunakan sistem CIE-*Lab* dengan mengukur parameter warna kecerahan (L^*), kromatisasi merah/hijau (a^*), dan kromatisasi kuning/biru (b^*). Perubahan warna secara keseluruhan (ΔE^*) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

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

Dimana (L^*) menunjukkan kecerahan, (a^*) dan (b^*) masing-masing menunjukkan kemerahan (hijau ke merah) dan kekuningan (biru ke kuning). Sedangkan (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 pada Tabel 1 (Valverde dan Moya, 2014):

Tabel 1. Klasifikasi perubahan warna

No	Nilai Klasifikasi	Keterangan
1	$0,0 < \Delta E^* = 0,5$	Perubahan Dapat Dihiraukan
2	$0,5 < \Delta E^* = 1,5$	Perubahan Warna Sedikit
3	$1,5 < \Delta E^* = 3$	Perubahan Warna Nyata
4	$3 < \Delta E^* = 6$	Perubahan Warna Besar
5	$6 < \Delta E^* = 12$	Perubahan Warna Sangat Besar
6	$\Delta E^* > 12$	Warna Berubah Total

3.5.2 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 menggunakan energi panas. Sebanyak satu gram sampel dimasukkan ke dalam cawan porselin yang bobotnya sudah diketahui. Kemudian dikeringkan dalam oven suhu 100-110°C selama 24 jam. Kemudian didinginkan dalam desikator selama 1 jam dan ditimbang. Kadar air dihitung menggunakan persamaan standar (SNI 8021.2014):

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

Keterangan:

KA = Kadar air (%)

BA = Berat awal (g)

BKT = Berat kering tanur (g)

3.5.3 Kerapatan

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

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

Keterangan:

KR = Kerapatan

m = Massa pelet (g)

v = Volume (cm³)

3.5.4 Ketahanan Terhadap Air

Perlakukan perendaman air yaitu dengan memperlakukan *black pellet* yang direndam dalam air dengan rentan waktu yang berbeda yaitu 5 menit, 30 menit, 1 jam, 6 jam, dan 12 jam. Perlakuan ini dilakukan untuk melihat perubahan visual/fisik pada pelet.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Simpulan yang dapat dari penelitian ini adalah:

1. Nilai ΔE^* dari perubahan warna dapat digunakan sebagai penduga kualitas pelet torefaksi dengan melihat besaran nilainya.
2. Persentase kadar air pada sampel kontrol sebesar 10,34%, sampel pelet dengan perlakuan COMB 7,28%. Sampel dengan perlakuan EF memiliki kadar air terendah sebesar 7,02%. Nilai kerapatan terkecil pada pelet TKKS diperoleh menggunakan parameter EF dengan nilai $0,55 \text{ g/cm}^3$ sedangkan nilai dengan menggunakan reaktor COMB diperoleh $0,57 \text{ g/cm}^3$ dan pelet kontrol $0,60 \text{ g/cm}^3$. Daya serap air pelet dengan perlakuan reaktor COMB dan EF memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan dengan sampel kontrol. Kerusakan struktur pelet biomassa disebabkan karena kerapatan pada pelet biomassa masih tergolong sangat rendah sehingga air masuk melalui celah pelet dengan sangat cepat.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis pada penelitian ini adalah perlunya dilakukan penelitian dengan jenis bahan baku yang berbeda untuk mendapatkan perbandingan hasil produk pelet biomassa yang baik dan sesuai standar yang berlaku.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, K., Irwanto, A. K., Siregar, N., Agustina, S. E., Tambunan, A. H., Yamin, M., Hartulistiyoso, E., Purwanto, Y. A., Wulandani, D., Nelwan, L. O. 1998. *Energi dan Elektrifikasi Pertanian: Proyek Peningkatan Perguruan Tinggi*. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 113 hlm.
- Aripin, P. 2013. *Pengaruh Torefaksi terhadap Sifat Fisik Pellet Biomassa yang Dibuat dari Bahan Baku Bagas Tebu*. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Jakarta. 87 hlm.
- Azhar, Rustamaji, H. 2009. Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 3(2): 26-29 hlm.
- Associate In Electrical Technology (AET). 2003. *Wood Pellet Manufacture in Scotland-A report produced for Scottish Enterprise Forest Industries Cluster*. Buku. Issue 1. Berlin, German. 156 hlm.
- Basu, P. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction-Practical Design and Theory*. Buku. Academic Press. San Diego. 145 hlm.
- Bergman, P.C.A. 2005. Combined torrefaction and pelletisation: The top process. *Journal Energy Research Centre of the Netherlands (ECN)*. 1(6): 1-29 hlm.
- 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 hlm.
- Chen, W.H., Kuo, P.C. 2010. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Journal Energy*. 35(6): 2580-2586 hlm.

- Chen, W. H., Kuo, P. C. 2011. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Journal Energy*. 36(2): 803-811 hlm.
- Chen, W.H., Peng, P., Bi, X.T. 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 44(1): 847-866 hlm.
- Cook, A. 2007. *Efficiency and Economic Advantages of Bulk Delivery of Biomass Pellet Fuel for Space Heating*. Buku. Pellet Fuels Institute Arlington. Virginia. 88 hlm.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2014. *Statistik Perkebunan Indonesia Kelapa Sawit Indonesia 2013-2015*. Direktorat Jenderal Perkebunan. Jakarta. 107 hlm.
- Duryat, Raflegau, S., Cannon, M.P., 2013. Dynamic of plantation of oil palm smallholdings in riau province sumatra indonesia. *Jurnal Sylva Lestari*. 1(1): 93-100 hlm.
- Fatriani, Sunardi, Arfianti. 2018. Kadar air, kerapatan, dan kadar abu wood pellet serbuk gergaji kayu gelam (*Melaleuca cajuputi* Roxb) dan kayu akasia (*Acacia mangium* Wild). *Enviroscientiae*. 14(1): 77-81 hlm.
- Fauzi, Y., Widyastuti, Y. E., Wibawa, I. S., Paeru, R. H. 2008. *Kelapa Sawit*. Buku. Penebar Swadaya. Jakarta. 236 hlm.
- Goetzl, A. 2015. Developments in the global trade of wood pellets of office of industries. *Journal US International Trade Commission*. 3(4): 77-85 hlm.
- Hanun, F, 2014. *Nilai Kalor Kayu yang Memiliki Kerapatan dan Kadar Lignin Berbeda*. Skripsi. Fakultas Kehutanan. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 27 hlm.
- Hattacharya, S. C., Leon, M.A., Rahman, M.M. 1996. *A Study on Improved Biomass Briquetting*. Buku. Energy Program SERD-AIT. Bangkok. 227 hlm.
- 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. *Journal of Bioresources* 10(4): 6961–6974 hlm.

- 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. *Journal of Bioresources*. 11(4): 10070-10086 hlm.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Park, B. H., Banuwa, I. S., Febrianto, F., Kim, N. H. 2017. 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 hlm.
- Hidayat, W., Febrianto, F. 2018. *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. 2018. Effects of heat treatment on the color change and dimensional stability of Gmelina arborea and Melia azedarach woods. In: E3S Web of Conferences 03010. DOI: 10.1051/e3sconf/20186803010.
- Hill, C.A.S. 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Process*. Buku. Department of Sustainable Organic Chemistry and Technology. Chicheter. 239 hlm.
- Irawan, A., Tubagus R., Nurmalisa. 2015. Proses torefaksi tandan kosong kelapa sawit untuk kandungan hemiselulosa dan uji kemampuan penyerapan air. *Jurnal Teknik Kimia*. 15(3): 190-195 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 hlm.
- Kementrian Perdagangan Republik Indonesia. 2014. *Market Brief Kayu Pellet di Korea Selatan*. Buku. ITPC Busan. Busan. 23 hlm.
- Kim, Y.H., Na, B.I., Ahn, B.J., Lee, H.W, dan Lee, J.E. 2015. Optimal condition of torrefaction for high energy density solid fuel of fast growing tree species. *Korean Journal Chemical Engineering*. 32(8): 1547-1553 hlm.
- Leaver, R.H. 2008. *Fuel Pellet Kayu dan Pasar Residential*. Buku. Speed Dating. London. 214 hlm.

- Lu, K. M., Lee, W. J., Chen, W. H., Liu, S. H., Lin, T. C. 2012. Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology*. 12(3): 98-105 hlm.
- Mahdie, M. F., Subari, D., Sunardi., Ulfah. 2016. Pengaruh campuran limbah kayu rambai (*Baccaurea motleyana*) dan api-api terhadap kualitas pelet sebagai energi alternatif dari lahan basah. *Jurnal Hutan Tropis*. 4(3): 246-253 hlm.
- Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S. 2004. Economics of producing fuel pellets from biomass. *Applied Engineering in Agriculture*. 22(3): 421-426 hlm.
- Maryenti, R., Komalasari, K., Helwani, Z. 2017. Pembuatan bahan bakar padat dari pelepah sawit menggunakan proses torefaksi pada variasi suhu waktu torefaksi. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*. 4(1):1-4 hlm.
- Mulyadi, A. F., Dewi, I. A., Deoranto, P. 2013. Pemanfaatan kulit buah nipah untuk pembuatan briket bioarang sebagai sumber energi alternatif. *Jurnal Teknologi Pertanian*. 14(1): 65-72 hlm.
- Nur, H. 2014. *Karakteristik Kelapa Sawit sebagai Bahan Baku Bioenergi*. Buku. PT. Insan Fajar Mandiri Nusantara. Bogor. 67 hlm.
- Obernberger, L., Thek, G. 2004. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy*, 2(7): 653-669 hlm.
- Panwar, V., Prasad, P., Wasewar, K. L. 2011. Biomass residue briquetting and characterization. *Journal of Energy Engineering ASCE*. 4(7): 108-114 hlm.
- Qian, Y. 2013. *The Wood Pellet Value Chain: An Economic Analysis of The Wood Pellet Supply Chain from The Southeast United States to European Consumers*. U.S. endowment for forestry and communities. http://www.usendowment.org/images/The_Wood_Pellet_Value_Chain_Revised_Final.pdf (diakses 12 Januari 2020 pukul 21.34 WIB).
- 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 hlm.

- Roos, A. 2012. The asian wood pellet markets united states departement of agriculture, forest service, pasific northwest research station. *Journal General Technical Report*. 3(6): 45-53 hlm.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano., I.G., Bakri, S., 2019. Karakterisasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)*. *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321-331 hlm.
- Shecillia, M., Helwani, S. 2016. Torefaksi batang sawit: Pengaruh kondisi proses terhadap nilai kalor produk torefaksi. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*. 3(2): 22-31 hlm.
- Sriharti., Salim, T. 2011. Pengaruh komposisi bahan terhadap karakterisasi pelet limbah biji jarak pagar (*Jatropha curcas* Linn). *Teknologi Indonesia*. 34: 40-48 hlm.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Hasanudin, U., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., 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 hlm.
- Sunarko. 2007. *Petunjuk Praktis Budidaya dan Pengolahan Kelapa Sawit*. Buku. Agromedia Pustaka. Jakarta. 77 hlm.
- Sunarko. 2009. *Budi Daya dan Pengelolaan Kebun Kelapa Sawit dengan Sistem Kemitraan*. Buku. Agromedia Pustaka. Jakarta. 158 hlm.
- Sunarwan, B., Juhana, R. 2013. Pemanfaatan limbah sawit untuk bahan bakar energi baru dan terbarukan (EBT). *Jurnal Tekno-Intensif*. 7(2): 1-14 hlm.
- Surono, U.B. 2013. Berbagai metode konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak. *Jurnal Teknik Kimia*. 3(1): 13-22 hlm.
- Syamsiro, M. 2016. Peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa dengan proses densifikasi dan torrefaksi. *Journal Mek. Sist. Termal*. 1(1): 7-13 hlm.
- Uemura, Y., Omar, W. N., Tsutsui, T., Yusup, S.B. 2011. Torrefaction of oil palm wastes. *Journal Fuel*. 90(8): 2585-2591 hlm.

- United States of Department of Agriculture (USDA). 2012. *The Asian Wood Pellet Markets*. United States of Department of Agriculture. Washington. Amerika. 172 hlm.
- 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 hlm.
- Wibowo, S., Laila, D.P.O., Khotib, M., Pari, G. 2017. Karakterisasi karbon pelet campuran rumput gajah (*Pennisetum purpureum scumach*) dan tempurung nyamplung (*Calophyllum inophyllum linn*). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 35(1): 73-82 hlm.
- Yulianto, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Hasanudin, U., Haryanto, A., Iryani, D. A. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian*. 2(9): 104–111 hlm.
- Zam H.A., Syahidah., Putranto, B. 2011. Karakteristik pelet kayu gmelina (*Gmelina arborea Roxb*). *Jurnal Forestry*. 2(1): 25-30 hlm.