

**KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT PRODUK TOREFAKSI
BIOMASSA PELEPAH KELAPA SAWIT SEBAGAI BAHAN
BAKAR ALTERNATIF PENGGANTI BATUBARA**

(TESIS)

Oleh

**MACHFUD KURNIA AKBAR
NPM 2025021001**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT PRODUK TOREFAKSI BIOMASSA PELEPAH KELAPA SAWIT SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF PENGGANTI BATUBARA

Perkembangan populasi penduduk dan ekonomi di Indonesia membuat konsumsi energi yang dibutuhkan semakin meningkat, hal ini membuat banyak pelaku energi mencari solusi untuk menanggulangi persoalan ini menggunakan energi baru dan terbarukan. Penelitian ini menyajikan studi penggunaan bahan bakar baru dan terbarukan yang berpotensi sebagai pengganti bahan bakar fosil yaitu pelepah kelapa sawit. Pelepah kelapa sawit akan diberikan torefaksi untuk meningkatkan nilai kalor pada produk. Torefaksi merupakan perlakuan panas pada suatu produk pada temperatur 200 sampai 300 °C pada tekanan atmosfer dan tanpa oksigen. Hasil pengujian nilai kalor produk menunjukkan bahwa proses torefaksi dapat meningkatkan nilai kalor, pada temperatur 200, 225, 250, 275 dan 300 °C menunjukkan nilai kalor maksimal sebesar 6.651 cal/g pada temperatur torefaksi 300 °C, setara dengan *Sub-Bituminous Coal A*. Uji *proximate* juga menunjukkan bahwa proses torefaksi pada pelepah kelapa sawit dapat menurunkan kadar air sebesar 5,71% dan kandungan zat volatile sebesar 2,93%, serta dapat meningkatkan kandungan karbon tetap sebesar 6,3%. Sedangkan pada uji *ultimate* pelepah kelapa sawit yang dilakukan pada sampel torefaksi dengan suhu 275 °C menunjukkan penurunan rasio O/C sebesar 0,01 dan terjadi peningkatan rasio H/C sebesar 0,11. Pengujian pembakaran produk torefaksi pelepah kelapa sawit pada temperatur 275 °C menunjukkan peningkatan pembentukan gas CO₂ sebesar 26.000 ppm dan dapat mereduksi gas CO yang terbentuk pada emisi gas buang sebesar 8.621 ppm, hal ini menjadikan produk torefaksi pelepah kelapa sawit memiliki potensi yang tinggi digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang dapat di kombinasikan dengan batubara, serta penambahan *exces air* dapat menurunkan konsentrasi pembentukan gas NO_x dan SO_x.

Kata Kunci :Pelepah Kelapa Sawit, Torefaksi, *Proximate*, *Ultimate*, Emisi

ABSTRACT

SOLID FUEL CHARACTERISTICS OF TOREFACTION OIL PALM FROND BIOMASS AS AN ALTERNATIVE FUEL FOR COAL

The growth of the population and economy in Indonesia has made the required energy consumption increase, Due to this, energy actors are looking for solutions to overcome this problem using new and renewable energy. This research presents a study of the use of new and renewable fuels that have the potential to replace fossil fuels, namely palm fronds. Palm oil fronds will be given a torrefaction treatment to increase the calorific value of the product. Torrefaction is the heat treatment of a product at a temperature of 200 to 300 °C at atmospheric pressure and without oxygen. The results of testing the calorific value of the product show that the torrefaction process can increase the calorific value, at temperatures of 200, 225, 250, 275 and 300 °C showing a maximum calorific value of 6.651 cal/g at a torrefaction temperature of 300 °C, equivalent to Sub-Bituminous Coal A. Test proximate also shows that the torrefaction process on palm fronds can reduce the water content by 5.71% and the volatile substance content by 2.93%, and can increase the fixed carbon content by 6.3%. Meanwhile, the ultimate test on palm fronds was carried out Torrefaction samples at a temperature of 275 °C showed a decrease in the O/C ratio of 0.01 and an increase in the H/C ratio of 0.11. Tests on burning palm frond torrefaction products at a temperature of 275 oC showed an increase in the formation of CO₂ gas by 26.000 ppm and could reduce CO gas formed in exhaust emissions by 8.621 ppm, this makes palm frond torrefaction products have high potential for use as fuel. Alternatives that can be combined with coal, as well as the addition of excess air can reduce the concentration of NO_x and SO_x gas formation.

Keywords : Oil palm frond, torefaction, proximate, ultimate, emissions

**KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT PRODUK TOREFAKSI
BIOMASSA PELEPAH KELAPA SAWIT SEBAGAI BAHAN
BAKAR ALTERNATIF PENGGANTI BATUBARA**

Oleh

MACHFUD KURNIA AKBAR

Tesis

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

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Tesis : **KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR
PADAT PRODUK TOREFAKSI BIOMASSA
PELEPAH KELAPA SAWIT SEBAGAI
BAHANBAKAR ALTERNATIF
PENGGANTI BATUBARA**

Nama Mahasiswa : **Machfud Kurnia Akbar**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2025021001

Porgram Studi : Magister Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



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

NIP. 19710331 199903 1 003



Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.

NIP. 19711214 200012 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin



Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19710817 199802 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

Anggota Penguji : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.** 

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

Penguji Utama II : **Amrizal, S.T., M.T., Ph.D** 

2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung


Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP 19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **15 Juni 2024**

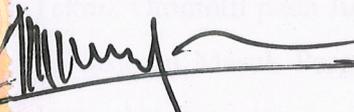
PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Bandar Lampung, Juni 2024
Yang Membuat




Machfud Kurnia Akbar
NPM 2025021001

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Tanjung Sari Kecamatan Tanjung Bintang Kabupaten Lampung Selatan pada 14 Desember 1993, sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara, dengan orang tua Bapak Sukirdi dan Ibu Sri Untari Ningsih. Jenjang pendidikan pertama yang dijalani penulis adalah Pendidikan Sekolah Dasar Negeri 3 Jatibaru pada tahun 2000 hingga tamat pada tahun 2006. Selanjutnya penulis melanjutkan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Tanjung Bintang pada tahun 2006 hingga lulus pada tahun 2009. Kemudian pada tahun 2009 penulis melanjutkan di Sekolah Menengah Kejuruan Negeri 2 Bandar Lampung dengan mengambil Jurusan Teknik Kendaraan Ringan, dan selesai pada tahun 2012.

Pada tahun 2012 penulis melanjutkan studi di Universitas Negeri Semarang dan mengambil studi Pendidikan Teknik Otomotif pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Jalur Undangan. Selama berstatus mahasiswa penulis mendapatkan beasiswa Peningkat Prestasi Akademik (PPA) selama 1 (Satu) Tahun. Penulis juga aktif pada Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMPRO) dari tahun 2012 sampai 2015, selama menjadi anggota himpunan penulis sering terlibat di beberapa kegiatan besar seperti Kajor Cup, Service Jitu dan Hemat serta *Mechanical Fair*. Serta pernah menduduki posisi wakil ketua Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin tahun 2014. Selain itu penulis aktif di organisasi *Creative Reaserch Club (CRC)* dari tahun 2012 sampai 2016. Semasa kuliah pada tahun 2015, penulis melakukan kerja praktik di PT Astra Honda Motor Semarang.

Setelah menyelesaikan studi perkuliahan S-1, penulis melanjutkan studi di Universitas Negeri Medan dengan mengambil program Pendidikan Profesi Guru Pra Jabatan pada tahun 2017 samapai 2018. Selama studi penulis melakukan Praktik Pengalaman Lapangan di Sekolah Menegah Kejuruan Negeri 1 Percut Sei

Tuan Kota Medan. Setelah selesai program Pendidikan Profesi Guru penulis fokus meniti karir sebagai seorang pendidik dari tahun 2018 sampai dengan tahun 2024. Penulis bekerja di SMKN 1 Merbau Mataram dan SMKN Tanjungsari dari tahun 2018 sampai dengan 2019 sebagai seorang pendidik. Kemudian pada tahun 2019 penulis pindah tugas di SMK N 1 Hulu Sungkai Kabupaten Lampung Utara sampai dengan sekarang.

Tahun 2020 Penulis melanjutkan pendidikan Pascasarjana (S2) di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung (UNILA) dengan mengambil konsentrasi konversi energi, sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik penulis melakukan penelitian Tesis dengan judul tugas akhir “Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Biomassa Pelepah Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pengganti Batubara” dibawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.

Bandar Lampung, Juni 2024
Yang Membuat

Machfud Kurnia Akbar

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah rabbil'alamin puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan menyusunnya menjadi sebuah karya ilmiah (Tesis) dengan baik. Sholawat beserta salam semoga selalu tercurah pada baginda Rasullullah Nabi Muhammad SAW.

Tesis dengan judul “Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Biomassa Pelepah Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pengganti Batubara” ini penulis susun guna memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magster Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Limpahan rasa hormat, cinta, kasih sayang dan terimakasih tiada tara kepada Ibunda Sri Untari Ningsih dan ayahanda Sukirdi yang telah mendidik dan membesarkan dengan penuh rasa cinta kasih sayang yang begitu tulus kepada Penulis yang selalu memberikan doa disetiap detik kehidupannya untuk keberhasilan Penulis. Limpahan kasih sayang dan cinta untuk istri penulis Palupi Budi Utami yang telah mendampingi, memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan studi magister. Kepada anak penulis Anindya Nisaka Qirani yang telah lahir dikehidupan selama melaksanakan studi. Bapak Budi Santosa dan ibu

Eni Supriatmi yang telah memberikan dukungan serta motivasi dalam penyelesaian studi magister. Serta saudara saudari penulis keluarga besar yang selama ini telah banyak memberikan doa, perhatian, kasih sayang, semangat dan dukungannya kepada Penulis, semoga Allah SWT memberikan kita semua keridhaan, kebaikan dan ketaatan kepada-Nya.

Penyelesaian Tesis ini tentu tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dukungan, serta semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. Selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Dr. Amrul, S.T.,M.T. Selaku dosen Pembimbing yang telah bersedia menyempatkan waktunya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
4. Dr. Muhammad Irsyad, S.T.,M.T., Selaku dosen pembimbing yang telah bersedia menyempatkan waktu dan pikirannya untuk membimbing dan mengarahkan dalam penulisan dan penyusunan tesis ini.
5. Dr. Harmen, S.T., M.T., Selaku Ketua Program Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Magister Teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh studi, baik berupa materi perkuliahan maupun teladan serta motivasi.

7. Teman-teman Pascasarjana Teknik Mesin angkatan 2020 semoga kebersamaan dan persaudaan kita tidak berakhir hanya dikampus ini.
8. Teman-teman tim torefaksi Mahasiswa Strata 1 dan Diploma 3 yang sudah bekerja sama dalam mengerjakan proyek torefaksi dan membantu dalam penyelesaian Tesis ini.
9. Semua pihak secara langsung maupun tidak langsung yang telah membantu dalam penyelesaian Tesis ini.

Penulis menyadari dalam penulisan tesis ini masih banyak kesalahan serta kekurangan. Menyadari hal tersebut dengan segala kerendahan hati penulis akan menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca untuk kesempurnaan tesis ini, yang tentunya akan lebih mendorong kemajuan penulis dikemudian hari. Semoga tesis ini dapat berguna bagi penulis maupun pada pembaca, akhir kata penulis ucapkan terimakasih.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Bandar Lampung, Mei 2024
Penulis,

Machfud Kurnia Akbar

Motto

“Sukses Adalah Jumlah Dari Upaya Kecil Yang Diulangi Hari Demi Hari”

*“Barang Siapa Mengerjakan Kebaikan Seberat Zaarah Pun, Niscaya Dia Akan
Melihat Balasannya”*

“Maka Sesungguhnya Bersama Kesulitan Itu Ada Kemudahan”

*“Jangan Tuntut Tuhanmu Karena Tertundanya Keinginanmu, Tapi Tuntut Dirimu
Karena Menunda Adapmu Kepada-Nya”*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat rahmat-Nya dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan judul “Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Biomassa Pelepah Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pengganti Batubara”

Sangat disadari oleh penulis tiada gading yang tak retak, penulis sadari masih banyak kekurangan dalam penyajian Tesis ini karena keterbatasan yang dimiliki, Oleh sebab itu dengan senang hati penulis menerima kritikan dan saran yang membangun dari semua pihak untuk sempurnanya Tesis ini agar dapat bermanfaat bagi yang membutuhkan.

Bandar Lampung, Mei 2024

Penulis,

Machfud Kurnia Akbar

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR SIMBOL	xxi
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Manfaat Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan Laporan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Biomassa	6
2.2 Pelepah Kelapa Sawit (<i>frond</i>)	6
2.3 Basis Komposisi Biomassa	9
2.3.1. <i>AsReceived Basic</i>	9
2.3.2. <i>Air Dry Basic</i>	10
2.3.3. <i>Total Dry Basic</i>	10
2.3.4. <i>Dry and Ash-free</i>	10
2.4 Parameter Analisis Bahan Bakar Padat	11
2.4.1 Nilai Kalor	11
2.4.2 Analisis Proximate	11
2.4.3 Analisis Ultimate	14
2.5 Densitas Energi	16
2.6 Torefaksi	17

2.6.1	Proses Torefaksi	18
2.6.2	Parameter Torefaksi	19
2.6.3	Kualitas Produk Torefaksi	21
2.7	Pembakaran	23
2.7.1	Waktu Pembakaran	24
2.7.2	Temperatur Pembakaran	24
2.7.3	Turbulensi	24
2.8	Mekanisme Pembakaran	25
2.8.1	Pemanasan dan Pengeringan	25
2.8.2	Pirolisis	25
2.8.3	Oksidasi Volatil	26
2.8.4	Oksidasi Arang	26
2.8.5	Pembentukan Emisi	26
2.8.6	Reaksi Bahan Anorganik	26
2.8.7	Pembakaran dan Pelepasan Panas	26
2.9	Efisiensi Pembakaran	27
2.10	Udara Pembakaran	27
2.10.1	Udara Primer	27
2.10.2	Udara Sekunder	27
2.10.3	Udara Tersier	28
2.11	Air Fuel Ratio	28
2.12	Pembakaran Stoikiometri	30
2.13	Pembakaran Non Stoikiometri	31
2.14	Excess Air	31
2.15	Emisi	32
2.15.1	Emisi CO	32
2.15.2	Emisi NO _x	33
2.15.3	Emisi N ₂ O	33
2.15.4	Emisi Sox	33
2.15.5	Emisi HC	34

III. METODE PENELITIAN

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	35
-----	-----------------------------	----

3.3.1	Tempat Penelitian	35
3.3.2	Waktu Pelaksanaan	36
3.2	Alat dan Bahan	36
3.2.1	Alat	36
3.2.2	Bahan	39
3.3	Metode Penelitian	40
3.3.1	Tahap Pertama	40
3.3.2	Pengujian	40
3.3.3	Analisis Produk	41
3.4	Pengambilan Data	42
3.4.1	Prosedur Pengujian Torefaksi	42
3.4.2	Parameter Karakteristik Bahan Bakar Padat	43
3.4.3	Persiapan Sampel Uji Emisi	44
3.4.4	Pengujian Emisi	46

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Eksperimen Torefaksi	48
4.2	Karakteristik Produk Torefaksi	50
4.3	Hasil Pengujian Nilai Kalor	52
4.4	<i>Mass Yield</i> dan <i>Energy Yield</i>	55
4.5	Hasil Pengujian Proximate	57
4.6	Hasil Pengujian Ultimate	59
4.7	Hasil Nilai Emisi	61
4.8	Hasil Nilai Emisi Polutan NO _x dan SO ₂	63

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	66
5.2	Saran	67

DAFTAR PUSTAKA	68
-----------------------	----

LAMPIRAN	73
-----------------	----

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Komposisi Kimia Biomassa Kelapa Sawit	7
Tabel 2.2 Nilai kalor dari beberapa sumber bahan baku biomassa.....	8
Tabel 2.3 Metode penyajian dari bahan bakar padat	15
Tabel 3.1 Kebutuhan Udara Pembakaran	46
Tabel 3.2 Kebutuhan Udara Primer dan Sekunder	46
Tabel 4.1 Perolehan Massa Padatan Torefaksi Pelelah Kelapa Sawit	49
Tabel 4.2 Klasifikasi Produk Torefaksi Pelelah Kelapa Sawit.....	54
Tabel 4.3 Rasio O/C dan Rasio H/C.....	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Pemanfaatan produk kelapa sawit.....	7
Gambar 2.2 Basis komposisi biomassa.....	9
Gambar 2.3 Densitas energi bahan bakar padat.....	17
Gambar 3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe turbular.....	36
Gambar 3.2 Bahan Bakar LPG.....	37
Gambar 3.3 Temperatur record.....	37
Gambar 3.4 Stopwatch digunakan untuk mengukur waktu tinggal.....	37
Gambar 3.5 Gas Analyzer Sauer mann.....	38
Gambar 3.6 Skema Unit Sistem Pembakaran Serbuk.....	38
Gambar 3.7 Limbah Pelepah Kelapa Sawit.....	39
Gambar 3.8. Diagram alir Penelitian.....	42
Gambar 4.1 Produk Torefaksi Pelepah Kelapa Sawit Berbentuk Kotak.....	50
Gambar 4.2 Produk Torefaksi Pelepah Kelapa Sawit Berbentuk Cacahan.....	51
Gambar 4.3. Nilai Kalor Pelepah Kelapa Sawit Tertorefaksi.....	52
Gambar 4.4 Grafik <i>Mass Yield</i>	55
Gambar 4.5 Grafik <i>Energi Yield</i>	56
Gambar 4.6 Pengujian <i>Proximate</i> Pada Biomassa Pelepah Kelapa Sawit.....	57
Gambar 4.7 Pengujian <i>Ultimate</i> Pada Biomassa Pelepah Kelapa Sawit.....	59
Gambar 4.8 Konsentrasi Kandungan Gas CO dan CO ₂	61

Gambar 4.9 Konsentrasi Kandungan Gas NO_x dan SO_264

DAFTAR SIMBOL

%	= Persen
ASH	= Kadar Abu
BPS	= Badan Pusat Statistik
C	= Karbon
Cal/gr	= Kalor per gram
CO	= Karbon Monoksida
CO ₂	= Karbon Dioksida
CO-Hb	= Karbonhaemoglobin
CPO	= Crude Palm Oil
CV	= Calorific value
FC	= Fixed carbon
H	= Hidrogen
H ₂ O	= Dihidrogen Monoksida
HHV	= High heating value
JIS	= Japan Industrial Standar
K	= Kalium
Kg	= Kilogram
kJ	= Kilo Joule
KJ/kg	= Kilojoule per kilogram

Kkal/kg	= Kilokalori per kilogram
LHV	= Low heating value
LPG	= Liquefied petroleum gas
MC	= Moisture content
MJ/kg	= Mega Joule per kilogram
mm	= Milimeter
MW	= Megawatt
N	= Nitrogen
NOx	= Nitrogen oksida
O	= Oksigen
°C	= Derajat Celcius
P	= Phospor
Ppm	= Part per million
S	= Sulfur
SO ₂	= Sulfur Dioksida
TGA	= Thermografimetric analyzer
TKKS	= Tandan Kosong Kelapa Sawit
TOE	= Tonne of oil equivalent
VM	= Volatile matter

I. PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Indonesia sebagai salah satu negara dengan populasi terbesar didunia membutuhkan pasokan energi yang sangat besar untuk memenuhi kebutuhannya. Dalam mencukupi energi nasional yang digunakan baik pada sektor rumah tangga maupun industri masih bergantung pada energi yang berasal dari bahan bakar fosil. Tercatat total pasokan energi primer Indonesia pada tahun 2020 sebesar 201,6 juta dengan pasokan terbesar adalah batubara sebesar 77,5 juta TOE (38,5%) diikuti minyak sebesar 66,2 juta TOE (32,8%) dan gas sebesar 35,2 juta TOE (17,4%) (Neraca Energi Nasional, 2021). Konsumsi energi dari bahan bakar fosil yang secara terus menerus menyebabkan persediaan menipis dan suatu saat akan habis, untuk itu perlu mencari sumber energi alternatif.

Salah satu energi alternatif yang potensinya cukup besar di Indonesia yakni energi yang bersumber pada biomassa. Biomassa didefinisikan sebagai bahan yang terbentuk dari spesies hidup seperti tumbuhan dan hewan, baik dalam kondisi yang hidup saat ini ataupun yang sudah lama, tidak seperti bahan bakar fosil, biomassa tidak membutuhkan jutaan tahun untuk dikembangkan (Basu 2013), oleh sebab itu biomassa dikategorikan sebagai sumber energi baru dan terbarukan.

Salah satu sumber biomassa yang banyak terdapat di Indonesia adalah limbah kelapa sawit. Sebagai produsen terbesar CPO di dunia, Indonesia memiliki total luas lahan sebesar 14,60 juta hektar dengan produksi CPO sebanyak 48,42 juta ton pada tahun 2019, hal ini meningkat dari tahun sebelumnya dengan total lahan seluas 14,33 juta hektar dengan produksi mencapai 42,9

juta ton (Statistik Kelapa Sawit Indonesia, 2019). Dari industri kelapa sawit timbul beberapa residu atau limbah yang tidak dimanfaatkan dengan baik diantaranya tandan kosong kelapa sawit, pelepah kelapa sawit, batang kelapa sawit dan lain lain. Abinsa dkk. (2013) menyatakan pada industri kelapa sawit dari perkebunan saat dilakukan peremajaan akan menghasilkan limbah batang kelapa sawit sebanyak 70% pada total luas lahan sebesar 41,07 ton/ha, pelepah kelapa sawit menghasilkan 20,5 % pada total luas lahan sebesar 16 ton/ha. Sedangkan saat pemangkasan untuk pelepah sawit menghasilkan limbah sebanyak 10,40 ton/ha. Berdasarkan hal tersebut ada potensi dari limbah kelapa sawit berupa biomassa pelepah kelapa sawit sebesar 151,84 juta ton/ha di Indonesia yang belum dimanfaatkan dengan maksimal.

Sebagai limbah biomassa pelepah kelapa sawit kurang baik apabila digunakan secara langsung. Penggunaannya secara langsung memiliki banyak kekurangan seperti kadar air yang tinggi, kepadatan yang rendah, dan *grindability* yang buruk (Bach & Skreiberg, 2016). Penggunaan limbah biomassa kelapa sawit sebagai energi perlu dilakukan perlakuan lanjut guna meningkatkan kualitas dan karakteristik dari bahan bakar biomassa, perlakuan tersebut antarlain yakni dengan proses torefaksi.

Torefaksi merupakan suatu proses termal yang dilakukan melalui kontak dengan media pemanas atau pembawa panas (Basu, 2013). Adapun Fisher dkk. (2012) menyatakan torefaksi merupakan perlakuan termal dalam kondisi tanpa udara dengan temperatur antara 200-300 °C. Perlakuan torefaksi juga dilakukan oleh Ukrit dan Kanit (2021) pada limbah biomassa ampas tebu dengan hasil bahwa proses torefaksi meningkatkan sifat bahan bakar dan nilai kalor dari ampas tebu mentah serta mengurangi rasio O/C dan H/C.

Torefaksi pada limbah kelapa sawit TKKS telah banyak dilakukan salah satunya yakni Wahyudi dkk. (2020) yang menyatakan produk torefaksi dari TKKS memiliki nilai kalor berkisar antara 16357-21083 kJ, setara dengan batubara subbituminous-C yang memiliki nilai kalor sebesar 19300-2100 kJ.

Sedangkan Haryanto dkk. (2020) menyatakan bahwa proses torefaksi meningkatkan kualitas bahan bakar pellet TKKS. Hal ini tercermin dari kadar air yang sangat rendah (0,32-0,52%) dan nilai kalornya yang meningkat dari 15,82 MJ/kg (tanpa torefaksi) menjadi 17,59 MJ/kg (dengan torrefaksi selama 45 menit). Lau dkk. (2018) mengungkapkan *energy yeald* dari pelepah kelapa sawit tertorefaksi dengan suhu 200°C menghasilkan 97,12% dengan nilai kalor 24,54 MJ/kg, suhu 250°C menghasilkan 92,70% dengan nilai kalor 26,62 MJ/kg dan torefaksi pada suhu 300°C menghasilkan 78,29% dengan nilai kalor 29,22 MJ/kg.

Pemanfaatan dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang di berikan perlakuan torefaksi seperti yang dilakukan Zaenal Arifin dkk. (2021) yang meneliti *co-combustion* dari batubara dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi pada alat *pulverized co-combustion burner* yang berkesimpulan bahwa pengaruh temperatur *burner* dan *burner* yang berbentuk *swirl* memberikan oksigen yang cukup dengan pembakaran lebih sempurna sehingga menurunkan konsentrasi emisi CO. Rendahnya konsentrasi N₂ dikarenakan mejauh dari *nozzle* yang temperaturnya lebih tinggi. Temperatur yang tinggi menurunkan konsentrasi SO₂ pada ruang bakar.

Lau dkk. (2018) meneliti proses torefaksi yang dilakukan pada pelepah kelapa sawit yang ditunjukkan pada proses *co-firing* untuk pembangkit listrik dengan variasi pada temperatur pada suhu 200, 225, 250, 275 dan 300°C menunjukan hasil bahwa pada temperatur optimum pada suhu torefaksi 250°C dengan waktu 30 menit menghasilkan pelepah sawit tertorefaksi yang memiliki HHV 26,62 MJ/kg sekaligus memiliki *energy yield* 92,70% hal ini kemudian membuat pelepah kelapa sawit tertorefaksi cocok sebagai bahan bakar *co-firing* untuk pembangkit listrik tenaga batu bara.

Berdasarkan potensi biomassa yang melimpah berupa pelepah kelapa sawit, belum banyak termanfaatkan perlu adanya studi lanjut guna pemanfaatan dari limbah pelepah kelapa sawit. Serta belum ada penelitian terkait penggunaan

metode torefaksi pada pelepah kelapa sawit yang diuji dan diteliti proses pembakarannya menggunakan sistem pembakaran serbuk. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti karakteristik bahan bakar limbah pelepah kelapa sawit melalui proses torefaksi dengan berbagai variasi temperatur. Proses torefaksi pada limbah pelepah kelapa sawit selanjutnya diuji pembakarannya pada tungku jenis pembakaran serbuk untuk diamati kandungan emisi yang dihasilkan baik berupa CO₂, SO₂ dan NO_x. Hasil penelitian ini diharap mampu memberikan sumbangsih dalam dunia penelitian dan referensi terhadap penggunaan bahan bakar alternatif biomassa pelepah kelapa sawit tertorefaksi.

1.2.Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini ialah:

1. Mendapatkan karakteristik produk torefaksi pelepah kelapa sawit berupa nilai kalor, analisis proximat, analisis ultimat, *mass yield* dan *energy yield*.
2. Menentukan nilai emisi gas pembakaran pada sistem pembakaran serbuk.produk torefaksi pelepah kelapa sawit

1.3.Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mengubah limbah industri kelapa sawit berupa pelepah kelapa sawit menjadi energi terbarukan.
2. Mengetahui kualitas produk dari hasil torefaksi pelepah kelapa sawit.

1.4.Batasan Masalah

Kajian pada penelitian ini difokus pada :

1. Proses torefaksi menggunakan limbah pelepah kelapa sawit.
2. Proses torefaksi limbah pelepah sawit menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe turbular dan menggunakan dua jenis ukuran yaitu 20x20 mm serta ukuran serabut atau cacahan.
3. Proses torefaksi dilakukan pada temperatur 200, 225, 250, 275 dan 300°C.

4. Proses pengujian *proximate* dan *ultimate* pada produk torefaksi pelepah kelapa sawit dipilih berdasarkan nilai kalor yang terbaik melihat dari nilai kalor tertinggi dan efisiensi energi dalam proses pembuatan produk.
5. Proses untuk melihat konsentrasi emisi gas hanya berfokus pada gas berupa CO dan CO₂ serta polutan SO₂ dan NO_x

1.5.Sistematika Penulisan Laporan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Pada bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan, batasan masalah serta sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisikan teori yang berkaitan dengan penelitian.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini terdiri dari hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, tempat penelitian, bahan penelitian, peralatan penelitian serta prosedur pengujian.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan hasil penelitian dan pembahasan dari data-data yang diperoleh saat pengujian dilaksanakan.

BAB V: SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisikan hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran yang ingin disampaikan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan tugas akhir.

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan, perhitungan laporan penelitian dan hasil uji laboratorium.

II. Tinjauan Pustaka

2.1 Biomassa

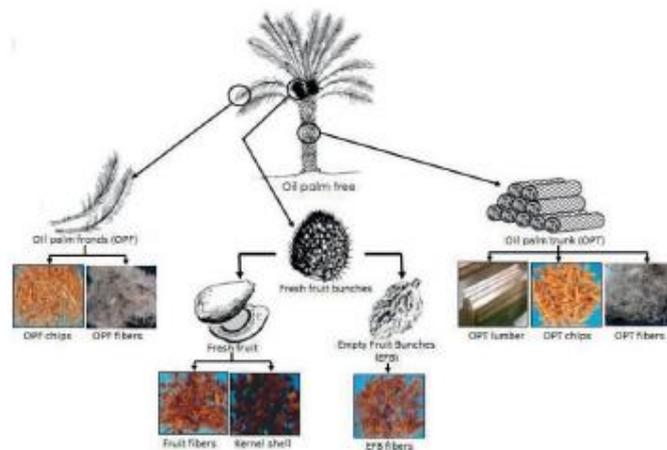
Energi yang banyak terdapat di dalam Indonesia yakni energi dari biomassa. Energi jenis ini bersifat terbarukan karena berasal dari bahan-bahan biologis di alam seperti pada pertanian, tanaman, perkebunan, limbah pada industri dan limbah rumah tangga yang bersifat organik. Biomassa sebagai energi terbarukan, terus terbentuk oleh interaksi antara karbon dioksida, udara, air, tanah dan sinar matahari. Namun Basu (2010) menyatakan material organik yang selama jutaan tahun telah ditransformasikan oleh proses geologi menjadi bahan bakar fosil seperti batubara atau minyak bumi bukan termasuk kedalam biomassa.

Kandungan energi pada material biomassa terbentuk dari beberapa ikatan kimia molekul karbon, hidrogen dan oksigen. Saat dekomposisi terjadi pada ikatan kimia tersebut maka akan menghasilkan energi dalam bentuk gas, cair dan padat sesuai dengan perlakuan yang diberikan (McKendry, 2002). Pada umumnya struktur utama penyusun pada biomassa adalah lignoselulosa yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin. Fariz (2017) menyatakan lignoselulosa merupakan material berserat yang membentuk dinding sel tumbuh-tumbuhan. Selain itu, komponen seperti protein, asam lemak ester, dan material organik lainnya (terdiri dari N, P dan K) juga terdapat pada biomassa tetapi dalam jumlah yang sedikit.

2.2 Pelepah Kelapa Sawit (*Fron*d)

Indonesia sebagai salah satu produsen minyak CPO terbesar di dunia dengan luas lahan perkebunan sawit mencapai 14,60 juta hektar dengan produksi CPO sebanyak 48,42 juta ton pada tahun 2019 (Statistik Kelapa Sawit Indonesia, 2019) membawa banyak potensi di dalamnya.

Abinsa dkk. (2013) menyatakan pada industri kelapa sawit saat dilakukan peremajaan akan menghasilkan limbah berupa batang kelapa sawit sebanyak 70% pada total luas lahan sebesar 41,07 ton/ha, pelepah kelapa sawit menghasilkan 20,5 % pada total luas lahan sebesar 16 ton/ha. Sedangkan saat pemangkasan untuk pelepah sawit menghasilkan limbah sebanyak 10,40 ton/ha. Berdasarkan hal tersebut ada potensi dari limbah kelapa sawit saat pemangkasan berupa biomassa pelepah kelapa sawit sebesar 151,84 juta ton/ha, sedangkan saat peremajaan ada sekitar 233,6 ton/ha pelepah kelapa sawit yang belum termanfaatkan dengan maksimal.



Gambar 2.1. Pemanfaatan produk kelapa sawit (Dungani dkk., 2018)

Umumnya hingga saat ini hanya 10% dari penggunaan residu biomassa kelapa sawit yang sudah termanfaatkan. Padahal limbah kelapa sawit memiliki kandungan lignoselulosa yang dapat dijadikan sumber *bioenergy* (Dungani dkk., 2018). Berikut komposisi kimia dari beberapa residu kelapa sawit (Dungani dkk., 2018) sebagai berikut:

Tabel 2.1 Komposisi kimia residu kelapa sawit

Jenis Residu	Helocellulose (%)	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Ash (%)
TKKS	68-86	43-65	17-33	13-37	1-6
Pelepah	80-83	40-50	34-38	20-21	2-3
Batang	42-45	29-37	12-17	18-23	2-3
Cangkang	40-47	27-35	15-19	48-55	1-4

Dari Tabel 2.1 di atas dapat dilihat kandungan hemisellulosa pada pelepah kelapa sawit cukup tinggi dibandingkan jenis yang lain, hal ini akan mengakibatkan sulitnya transportasi dan kehilangan energi ketika dibakar. Perlakuan proses torefaksi pada pelepah kelapa sawit ditunjukkan untuk mengurangi kadar kandungan hemisellulosa didalamnya. Pada proses torefaksi kandungan hemisellulosa akan mengalami proses dekomposisi lebih cepat dibandingkan dengan kandungan selulosa dan kandungan lignin, sehingga hal ini dapat menyebabkan zat volatil akan berkurang pada produk hasil torefaksi pelepah kelapa sawit. Limbah kelapa sawit sendiri memiliki potensi pemanfaatan yang besar karena memiliki nilai kalor yang cukup untuk dimanfaatkan. Berikut nilai kalor dari beberapa biomassa dapat ditunjukkan pada tabel berikut :

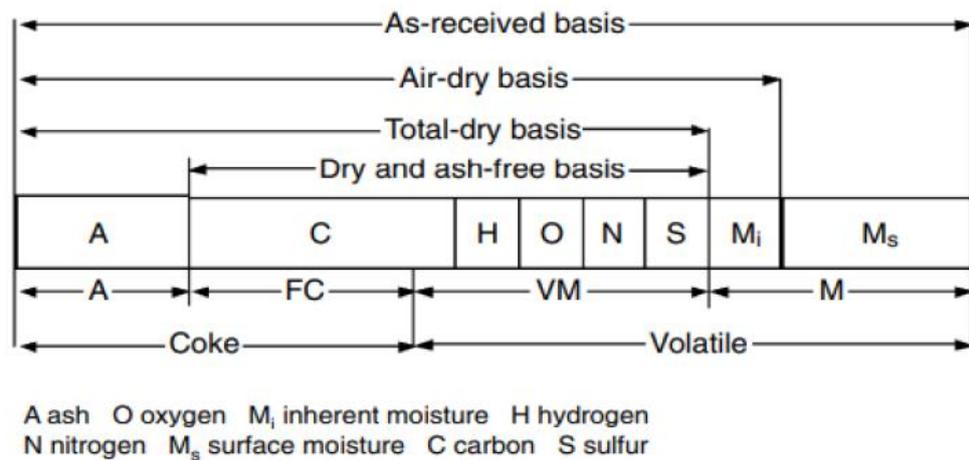
Tabel 2.2 Nilai kalor dari beberapa sumber bahan baku biomassa (Tajali, 2015)

No.	Jenis	Bahan Baku (Feedstock)	CV Kkal/kg	Moistur e %
1.	Kelapa Sawit	Serat sawit (fiber)	3340	30
		Cangkang sawit (shell)	4300	15
		Tandan kosong sawit (EFB)	1200	45
		Pelepah sawit (Frond)	3350	20
		Batang <i>replanting</i> sawit (Trunk)	3500	20
2.	Tebu	Ampas tebu (bagasse)	1850	50
		Daun dan pucuk tebu (Cane)	3000	30
3.	Kelapa	Sabut kelapa	3300	30
		Tempurung kelapa (coconut shell)	4300	15
4.	Karet	Batang <i>replanting</i> karet (trunk)	4400	15
5.	Padi	Sekam padi (rice husk)	3350	12
		Jerami padi	2800	50
6.	Jagung	Tongkol jagung (corn cob)	3500	14
		Batang dan daun jagung	2500	40
7.	Kayu	Kayu limbah industri (woodwaste)	4400	15
8.	Sampah Kota	Refuse derived fuel (RDF from MSW)	2200	20
9.	Pulp & paper	Black liquor	3300	70

Bedasarkan Tabel 2.2 diatas memperlihatkan nilai kalor pada pelepah kelapa sawit memiliki potensi untuk dikembangkan. Pelepah kelapa sawit sendiri menajadi potensi yang cukup besar digunakan karena pada pohon sawit yang sudah berproduksi pertahun akan menghasilkan pelepah kelapa sawit sekitar 40-50 pelepah pertahunnya dengan berat pelepah sebesar 4,5 kg untuk berat pelepah kering perpelepah. Dalam satu hektar perkebunan sawit dapat menghasilkan 6400-7500 pelepah pertahunnya dengan nilai kalor dari biomassa pelepah sawit sekitar 17.200 kJ/kg (Susilowati dkk., 2017).

2.3 Basis Komposisi Biomassa

Komposisi pada bahan bakar sering dinyatakan dalam basis yang berbeda tergantung pada situasinya. Ada beberapa basis analisis biomassa ditunjukkan pada gambar 2.1. dibawah ini.



Gambar 2.2 Basis komposisi biomassa

2.3.1 AsReceived Basic

Bila menggunakan analisis *as received basic* maka analisis proksimat biomassa menggunakan akumulasi dari kandungan air, *volatil matter*, *fix carbon* dan abu. Sedangkan untuk analisis ultimate menggunakan akumulasi kandungan karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, abu dan kandungan air baik kandungan air di permukaan maupun di dalam biomassa.

2.3.2 Air Dry Basic

Ketika bahan bakar dikeringkan di udara, *moisture surface* dihilangkan sementara *inherent moisture* dipertahankan. Jadi, untuk menyatakan konstituen atas *air dry basis* (ad), jumlahnya dibagi dengan massa total dikurangi kelembaban permukaan. Contoh, persentase karbon berdasarkan udara kering dihitung sebagai berikut:

$$C_{ad} = \frac{100C}{100-Ma} \% \dots\dots\dots(2.1)$$

Ma adalah massa *surface moisture* yang dihilangkan dari 100 kg bahan bakar lembab setelah dikeringkan di udara.

2.3.3 Total Dry Basic

Komposisi bahan bakar berdasarkan *total dry basis* (td) adalah parameter praktis dan mudah diukur, basis yang menyatakan biomassa benar-benar bebas dari moisture conten baik *surface moisture* maupun *inherent moisture*. Sehingga persamaannya menjadi:

$$C_{td} = \frac{100C}{100-M} \% \dots\dots\dots(2.2)$$

M merupakan *total moisture* didalam bahan bakar.

2.3.4 Dry and Ash-free

Komposisi *dry and Ash-free* (DAF) yaitu komposisi bahan bakar dengan menghilangkan kandungan abu dan *total moisture*. Mengikuti contoh yang telah disebutkan diatas, persentase karbon pada basis DAF, C_{DAF} sebagai berikut.

$$C_{DAF} = \frac{100C}{100-M-ASH} \% \dots\dots\dots(2.3)$$

(100-M-ASH) merupakan total biomassa tanpa kandungan abu dan *total moisture*.

2.4 Parameter Analisis Bahan Bakar Padat

Karakteristik biomassa dapat dilihat baik secara fisik, kimiawi, sifat panas, dan kandungan kimia. Adapun terdapat tiga analisis yang dapat dilakukan dalam menentukan sifat kimiawi dan karakteristik suatu bahan bakar yaitu analisis *proximate*, analisis *ultimate*, dan analisis *thermogravimetric*. Parameter yang menjadi acuan dari kualitas bahan bakar padat yaitu parameter komponen berdasarkan penyusun batubara. Dalam mendapatkan komponen penyusun dari batubara digunakan dua jenis analisis yaitu *proximate analysis* dan *ultimate analysis*.

2.4.1 Nilai Kalor

Nilai Kalor bahan bakar merupakan nilai besarnya panas yang dihasilkan dari hasil pembakaran bahan bakar padat. Nilai kalor terdiri dari *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). HHV dapat didefinisikan sebagai panas yang dilepaskan oleh satuan massa ataupun volume bahan bakar pada temperatur awal sebesar 25°C setelah dibakar habis dan sisa pembakaran kembali ke temperatur awal sebesar 25°C. Panas ini juga termasuk panas laten dari penguapan air. HHV ini juga dapat disebut dengan *Gross Caloric Value*. LHV dapat didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan dengan pembakaran total pada jumlah tertentu. LHV ini juga berbeda dengan HHV yaitu pada proses pembakaran tidak melibatkan panas laten dari penguapan air. LHV disebut juga sebagai nilai kalor bersih atau *Nett Calorific Value*. Nilai kalor bahan bakar padat dari produk torefaksi mengacu pada standar klasifikasi dari batubara berdasarkan standar ASTM D-388 (Basu, 2013).

2.4.2 Analisis *Proximate*

Analisis *proximate* merupakan salah satu analisis yang ditunjukkan untuk mengetahui komponen penyusun bahan bakar padat batubara meliputi nilai kandungan karbon tetap (*fixed carbon*), persentase zat mudah terbakar (*volatile matter*), persentase kandungan air (*moisture*

content), dan kandungan abu (*ASH*). Berikut merupakan persamaan kandungan uji ultimate *as received basis* (Basu, 2010).

$$\text{Proximate: VM + FC + M + ASH} = 100\% \dots\dots\dots(2.4)$$

Analisis nilai proximat dilaksanakan dengan menggunakan *Thermogravimetric Analyzer* (TGA-501) by Leco dengan menggunakan acuan standar ASTM D3172-13. Cara pengukuran uji proximate yaitu membutuhkan sampel berukuran 60 mesh. Selanjutnya sampel ditempatkan dalam cawan (*crucible*) dan dimasukkan tungku dalam peralatan. Selanjutnya hasil analisis akan terbaca pada display untuk selanjutnya di print (BRIN, 2022).

- a. Karbon Tetap (*Fixed Carbon*) adalah karbon tetap yang ditemukan setelah pelepasan zat volatil. Karbon ini juga berbeda dari karbon lainnya, karena adanya unsur karbon yang menghilang selama proses penguapan kemudian membentuk ikatan hidrokarbon bersama zat volatil. Karbon tetap merupakan penyumbang terbesar dari nilai kalor pada bahan bakar padat.

Nilai kadar karbon diperoleh melalui pengurangan angka 100 dengan jumlah kadar air (kelembaban), kadar abu, dan jumlah zat terbang. Nilai ini semakin bertambah seiring dengan tingkat pembatubaraan. Kadar karbon dan jumlah zat terbang digunakan sebagai perhitungan untuk menilai kualitas bahan bakar.

- b. Zat Volatil (*Volatile Matter*) merupakan komponen dalam bahan bakar padat selain air yang terlepas ketika bahan bakar dilakukan pemanasan dengan kondisi *inert* atau tanpa oksigen. Zat volatile ini merupakan hidrokarbon siklik, alifatik

maupun aromatik. Zat volatil menghasilkan kalor dalam proses pembakaran namun tidak sebesar nilai karbon tetap.

Kandungan *volatil matter* mempengaruhi kesempurnaan pembakaran dan intensitas api. Penilaian tersebut didasarkan pada rasio atau perbandingan antara kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) dengan zat terbang (*volatil matter*) yang disebut dengan rasio bahan bakar (*fuel ratio*). Semakin tinggi nilai *fuel ratio* maka jumlah karbon di dalam bahan bakar padat yang tidak terbakar juga semakin banyak.

- c. Kandungan air (*Moisture Content*) dalam bahan bakar padat terbagi menjadi dua jenis, yaitu *surface moisture* dan *inherent moisture*. *Surface moisture* merupakan kandungan air yang terdapat pada bagian permukaan dari bahan bakar padat, sedangkan *inherent moisture* merupakan kandungan air yang terdapat pada pori-pori bahan bakar padat. *Surface moisture* lebih mudah untuk dihilangkan dibandingkan dengan *inherent moisture*. Gabungan dari kedua jenis kandungan air ini disebut dengan *total moisture*. Kadar kelembaban mempengaruhi jumlah pemakaian udara primer, bahan bakar padat dengan kelembaban tinggi akan membutuhkan udara primer lebih banyak untuk mengeringkan bahan bakar.
- d. Abu (*Ash*) merupakan kandungan yang terdiri mineral dalam bahan bakar padat dalam bentuk unsur dan oksida. Mineral yang terkandung dalam abu berupa silika, natrium, magnesium, dan oksida.

Kandungan abu akan terbawa bersama gas pembakaran melalui ruang bakar dan daerah konversi dalam bentuk abu terbang (*fly ash*) yang jumlahnya mencapai 80 persen dan abu

dasar sebanyak 20 persen. Semakin tinggi kadar abu, secara umum akan mempengaruhi tingkat pengotoran (*fouling*), keausan dan korosi pada peralatan yang dilalui.

2.4.3 Analisis *Ultimate*

Analisis *ultimate* merupakan salah satu analisis untuk mengetahui parameter penyusun bahan bakar padat seperti kadar karbon, kadar hidrogen, kadar nitrogen, kadar oksigen, dan total sulfur (Aulia dkk., 2021). Sedangkan kelembapan, kandungan anorganik, abu tidak berkaitan dengan analisis *ultimate*. Analisis uji *ultimate* ditentukan menggunakan acuan standar ASTM D 5373. Analisis *ultimate* dilakukan untuk mengetahui nilai komponen kimia yang terkandung di dalam sampel bahan bakar padat dengan menggunakan *instrument elemental analyzer*. Untuk menentukan persentase oksigen cukup rumit, maka persentase oksigen ditentukan melalui pengurangan 100% dikurangi penjumlahan persentase total karbon, hidrogen, nitrogen dan belerang (Basu, 2010).

$$\text{Ultimate: } C + H + O + N + S + A + M = 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Namun, teknik ini mengakumulasikan semua kesalahan dalam menentukan unsur-unsur lain ke dalam nilai yang di hitung untuk oksigen. Selain menentukan kandungan diatas, analisis *ultimate* dapat digunakan untuk perhitungan nilai kalor (HHV dan LHV) dan digunakan sebagai dasar perhitungan pembakaran meliputi penentuan laju umpan batu bara dan kebutuhan udara pembakaran dunia (Miller & Tilman, 2008).

- a. Nilai karbon, karbon yang terdapat dalam batubara akan terjadi peningkatan sesuai dengan meningkatnya derajat batubara. Karbon bertambah sesuai dengan naiknya derajat dari batubara sekitar 60-100%.

- b. Nilai hidrogen, hidrogen yang terdapat dalam batubara terdiri dari kombinasi antara alifatik dan aromatik dan berangsur habis akibat dari evolusi metana.
- c. Nilai oksigen, oksigen yang terdapat dalam batubara berupa ikatan hidroksil, metoksil, dan juga karbonit, yang merupakan oksigen tidak reaktif.
- d. Nilai nitrogen, nitrogen yang terdapat dalam batubara dapat berupa senyawa organik. Nitrogen yang terbentuk hampir seluruhnya berasal dari protein bahan tanaman asalnya. Jumlah dari nitrogen sekitar 0,5-3,0%. Batubara bituminus biasanya memiliki kandungan nitrogen yang lebih banyak dibandingkan lignit dan antrasit.
- e. Nilai sulfur, sulfur dalam batubara pada umumnya hanya terdapat dalam jumlah yang kecil dan kemungkinan berasal dari protein tanaman pembentuk dan juga diperkaya oleh bakteri sulfur.

Metode penyajian dari karakteristik bahan bakar padat atau batubara memiliki penyajian yang berbeda-beda. Oleh karena itu diperlukan adanya referensi kondisi yang sama untuk membandingkannya. Berikut merupakan metode penyajian dari karakteristik bahan bakar padat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Metode penyajian dari bahan bakar padat.

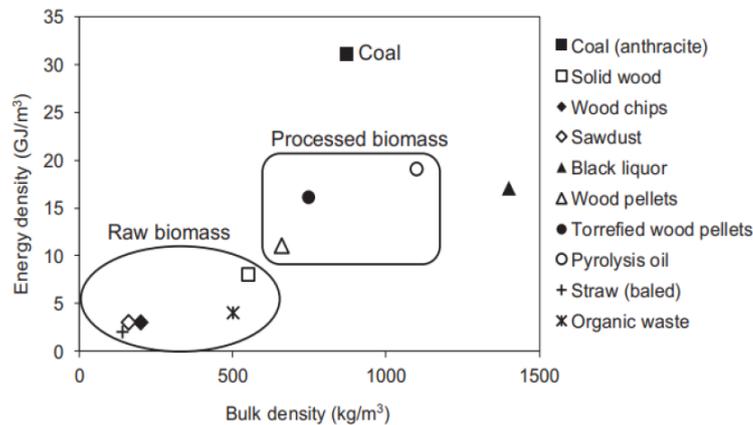
a. <i>As received</i> (ar)	Metode <i>ash received</i> mengacu pada pemanfaatan langsung pada pembakaran. Kandungan batu bara tersebut diasumsikan seluruh kandungan batubara.
----------------------------	--

b. <i>Air dried basis</i> (adb)	Metode <i>air dried basis</i> menunjukkan komposisi batubara tanpa kandungan <i>surface moisture</i> .
c. <i>Dry basis</i> (db)	Metode <i>dry basis</i> menunjukkan kandungan air atau <i>total moisture</i> .
d. <i>Dry ash-free</i> (daf)	Metode <i>dry, ash-free</i> menunjukkan batubara tanpa air dan abu.
e. <i>Dry, mineral-matter free</i> (dmmf)	Metode <i>dry, mineral-matter free</i> mengasumsikan kandungan batubara hanya komponen organik tanpa adanya air sedikit.
f. <i>Moist, ash-free</i> (maf)	Metode <i>Moist, ash-free</i> menunjukkan batubara tanpa abu, tetapi masih mengandung air sedikit.
g. <i>Moist, mineral-matter free</i>	Metode <i>Moist, mineral-matter free</i> menunjukkan karakteristik batubara tanpa abu dan mineral, tetapi masih mengandung air.

2.5. Densitas Energi

Densitas adalah parameter yang digunakan untuk pengukuran massa setiap satuan volume (kg/m^3). Densitas bergantung pada besar massa dan volume benda. Semakin tinggi densitas suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya. Mengacu pada definisi densitas, maka densitas energi bisa disimpulkan sebagai parameter yang digunakan untuk pengukuran energi per satuan volume. Berbeda dengan nilai kalor yang merupakan satuan energi per satuan massa. Apabila bahan bakar memiliki densitas energi yang tinggi, maka semakin besar juga nilai kalor yang dapat dibangkitkan. Dalam kasus perbandingan densitas energi batu bara dibandingkan dengan densitas energi bahan bakar lainnya diperlihatkan pada Gambar 2.2. biomassa mentah memiliki densitas energi yang rendah karena memiliki banyak kandungan

yang membuat efek negatif pada proses pembakaran. Salah satu cara meningkatkan densitas energi salah satunya menggunakan konversi termokimia torefaksi. Torefaksi meningkatkan densitas energi biomassa dengan mengurangi kandungan oksigennya yang mengarah ke biomassa padat produk dengan nilai kalor mendekati batubara (Thaim, Rasid, dkk., 2019).



Gambar 2.3. Densitas energi bahan bakar padat (Gil & Rubiera, 2018)

2.6. Torefaksi

Torefaksi merupakan suatu proses termokimia tanpa kehadiran oksigen, dimana biomassa dipanaskan secara perlahan dalam kisaran suhu yang ditentukan dan ditahan untuk waktu yang ditentukan sehingga mengakibatkan degradasi kandungan hemiselulosa dengan tujuan untuk memaksimalkan hasil massa dan energi dari produk padat (Basu, 2013). Proses torefaksi dilakukan pada rentang suhu proses antara 200-300° C. Jika proses torefaksi dilakukan pada suhu di atas ini akan menyebabkan devolatilisasi serta karbonisasi pada polimer produk, lebih lanjut akan terjadi pengurangan lignin sangat cepat apabila suhu diatas 300°C yang menyebabkan produk dari torefaksi akan sulit dibuat pellet. Prina dkk. (2006) menyatakan bila pemanasan dilakukan pada suhu diatas 300° C dapat menyebabkan perengkahan termal selulosa dengan cepat yang menyebabkan pembentukan tar pada temperatur 300-320° C.

Proses torefaksi biomassa dapat memperbaiki karakteristiknya sebagai bahan bakar padat, hal ini ditandai dengan meningkatnya nilai kalor, densitas energi

yang tinggi, hidrofobia serta mengurangnya kandungan air pada produk biomassa. Proses torefaksi membuat kandungan karbon tetap pada biomassa akan meningkat dan kandungan zat terbang akan menurun serta mengurangi kandungan bahan mudah menguap yang tidak diinginkan seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur sehingga kualitas dari biomassa meningkat dan biomassa memiliki karakteristik mendekati batubara.

2.6.1 Proses Torefaksi

Torefaksi merupakan proses termal yang terbagi dalam beberapa tahapan seperti pemanasan, pengeringan, torefaksi dan pendinginan. Basu (2010) menyatakan proses-proses dari torefaksi antara lain:

a. Tahap Pemanasan Awal

Pemanasan awal biomassa sampai tahap pengeringan biomassa tercapai. Dimana pada tahap ini kondisi pemanasan biomassa yang terjadi pada temperatur $\sim 100^{\circ}\text{C}$ dari temperatur kamar menuju temperatur pengeringan.

b. Tahap Pengeringan

Pada tahap ini terjadi kenaikan temperatur $\sim 100^{\circ}\text{C}$ yang bertujuan untuk menguapkan kandungan air yang terdapat didalam biomassa pada suhu konstan sampai kandungan air yang terdapat pada permukaan biomassa menghilang.

c. Tahap Pengeringan Lanjut

Pada tahap ini biomassa dipanaskan lebih lanjut hingga temperatur mencapai $\sim 200^{\circ}\text{C}$ sebelum terjadi proses torefaksi. Selama tahap ini berlangsung terjadi penguapan fraksi massa, kandungan air dan senyawa organik telah hilang dari biomassa.

d. Tahap Torefaksi

Selama tahap ini proses sebenarnya terjadi karena pada tahap ini terjadi proses depolimerisasi biomassa. Ketika tahap ini berlangsung diperlukan rentang waktu tertentu untuk proses ini sesuai dengan temperatur reaksi yang ditentukan. Selama proses torefaksi terjadi reaksi eksotermis pada temperatur 250-300°C.

e. Tahap Pendinginan

Produk padatan yang dihasilkan dari proses torefaksi memiliki temperatur yang tinggi sehingga harus didinginkan hingga mencapai temperatur ruangan. Hal ini karena dikhawatirkan pada temperatur tinggi dapat menyebabkan produk torefaksi mengalami oksidasi setelah berkontak dengan udara.

2.6.2 Parameter Torefaksi

Proses torefaksi pada material lignoselulosa akan merubah struktur polimernya, dan hal hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhi selama proses torefaksi antara lain:

a. Temperatur

Meningkatnya temperatur reaksi torefaksi akan meningkatkan laju dekomposisi yang terjadi pada struktur penyusun material biomassa. Hal itu akan mengakibatkan terjadinya peningkatan kehilangan massa dan karbonisasi material biomassa. Temperatur yang tinggi akan menghasilkan jumlah massa dan energi lebih rendah tetapi kerapatan energinya lebih tinggi. Fraksi karbon tetap pada biomassa meningkat sedangkan kandungan hidrogen dan oksigen akan berkurang pada saat kenaikan temperatur torefaksi (Bridgeman dkk., 2008). Temperatur reaksi yang tinggi melebihi temperatur torefaksi akan meningkatkan laju dekomposisi yang mengakibatkan komponen lignoselulosa banyak dikonversikan ke dalam bentuk gas dan cairan, sehingga produk padatan yang

dihasilkan pada proses torefaksi menjadi berkurang (Couhert dkk., 2009).

b. Waktu tinggal

Waktu tinggal berkaitan dengan lamanya waktu material biomassa bertahan di dalam reaktor. Parameter ini mempengaruhi proses dekomposisi dan karbonisasi selama proses torefaksi berlangsung. Waktu tinggal dapat bervariasi tergantung pada temperatur torefaksi, jenis biomassa, dan produk akhir yang diinginkan. Proses torefaksi dengan waktu tinggal yang lebih lama akan menghasilkan massa produk padatan yang lebih rendah akan tetapi memiliki energi padatan yang lebih tinggi, walaupun efek waktu tinggal tidak mempengaruhi sifat biomassa secara signifikan (Pimchuai dkk., 2010).

c. Ukuran partikel

Ukuran partikel mempengaruhi luas permukaan kontak perpindahan panas antara material biomassa dan sumber panas selama terjadi proses dekomposisi termal. Semakin kecil ukuran bahan baku yang digunakan maka permukaan perpindahan panas semakin luas dan meningkatkan laju pemanasan ke permukaan bahan baku. Hal ini mengakibatkan meningkatnya laju dekomposisi pada material biomassa dan meningkatkan efisiensi torefaksi terutama pada kebutuhan waktu tinggal yang pendek (Bergman dkk., 2005).

d. Jenis biomassa

Jenis biomassa merupakan parameter penting yang dapat mempengaruhi proses torefaksi. Hal ini karena kandungan hemiselulosa paling banyak terdegradasi pada saat proses torefaksi, akibatnya akan kehilangan jumlah massa yang lebih tinggi pada biomassa yang banyak mengandung hemiselulosa.

Kandungan xilan dari hemiselulosa paling reaktif dalam kisaran suhu torefaksi sehingga menurunkan massa lebih cepat dari komponen padat lainnya dari biomassa (Basu, 2010).

2.6.3 Kualitas Produk Torefaksi

Menurut Tumuluru (2010) produk torefaksi dari biomassa kayu idealnya menghasilkan 82 % wt produk padatan (*char*). Beberapa penelitian lain menunjukkan produk selain padatan dan gas, tetapi terdapat tar dari hasil produk torefaksi. Tar merupakan cairan yang muncul akibat adanya kondensasi gas hasil pirolisis biomassa karena perbedaan temperatur yang tinggi (Suwandono, 2015). Kualitas produk torefaksi tidak hanya dinilai dari berkurangnya massa produk torefaksi, karena pengurangan massa belum tentu meningkatkan kepadatan energi. Pengurangan massa yang terlalu ekstrim dapat menurunkan kepadatan energi dari produk torefaksi. Kualitas produk torefaksi diidentifikasi dengan beberapa parameter yaitu (Basu, 2013):

- a. *Mass yield* (MY) merupakan fraksi massa asli biomassa yang tersisa dari hasil torefaksi. *Mass yield* ditentukan dengan dua perlakuan yaitu kehilangan massa karena pengeringan dan kehilangan massa karena torefaksi. *Mass yield* akibat torefaksi dapat diartikan bahwa fraksi dari komponen organik asli biomassa yang diubah menjadi arang, dan harus ditentukan dengan kondisi “*dry ash free*” (daf). Sedangkan produk torefaksi dari biomassa yang memiliki kandungan anorganik tinggi memiliki jumlah total padatan mencakup abu, maka pada kondisi “*dry base*” (db). Selain dua kondisi tersebut, terdapat kondisi lain yang dapat menentukan kondisi material secara menyeluruh “*as-received*” (ar).

$$MY_{daf} = \frac{mf_{daf}}{m_o} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$MY_{db} = \frac{mf_{db}}{m_o} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$MY_{ar} = \frac{mf_{ar}}{m_o} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

My_{daf} : *Mass yield “dry ash free”*

My_{db} : *Mass yield “dry based”*

My_{ar} : *Mass yield “as-received”*

mf_{daf} : *Massa total biomassa tertorefaksi “dry ash free”*

mf_{db} : *Massa total biomassa tertorefaksi “dry based”*

mf_{ar} : *Massa total biomassa tertorefaksi “as-received”*

m_o : *Massa total biomassa mentah.*

- b. *Energy Density* merupakan parameter lain dari produk torefaksi. Parameter ini memberikan jumlah energi yang dilepaskan ketika satuan massa produk dibakar. *Energy density* dikenal dengan istilah nilai kalor.

$$\begin{aligned} \text{Energy density} &= \text{Jumlah energi yang dilepaskan satuan} \\ &\text{massa dari biomassa tertorefaksi sepenuhnya terbakar} \\ &= HHV \end{aligned}$$

- c. *Energy yield* (EY) merupakan fraksi energi dalam biomassa produk torefaksi. *Energy yield* menentukan komponen energi yang tetap berada dalam biomassa setelah komponen tanpa hilang selama torefaksi. *Energy yield* memberikan nilai kuantitatif dari energi pada biomassa setelah torefaksi, didefinisikan sebagai:

$$\text{Energy Yield (EY)} = \frac{E_{\text{torrefied product}}}{E_{\text{raw biomass}}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Energy yield dapat dihitung dalam bentuk nilai kalor biomassa sebelum dan sesudah torefaksi:

$$EY = MY \times \frac{HHVf}{HHVo} \dots\dots\dots(2.10)$$

2.7. Pembakaran

Pembakaran merupakan proses oksidasi bahan bakar secara cepat yang disertai dengan produksi panas atau cahaya. Pelepasan panas dan cahaya ini ditandai dengan terbentuknya api. Pembakaran yang sempurna terjadi hanya jika terdapat pasokan oksigen yang cukup dan biasanya pembakaran dilakukan dengan udara berlebih untuk menjamin pembakaran yang sempurna. Proses pembakaran juga dapat diartikan sebagai reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen dari udara. Hasil pembakaran utama adalah karbondioksida dan uap air serta energi panas. Sedangkan hasil pembakaran yang lain adalah karbonmonoksida, abu (ash), NO_x, atau SO_x, tergantung dari jenis bahan bakarnya.

Pembakaran dikatakan sempurna apabila campuran bahan bakar dan oksigen (dari udara) mempunyai perbandingan yang tepat (*stoichiometric*), hingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, dikatakan campuran kurus dan hasil pembakarannya menghasilkan api oksidasi. Sebaliknya, bila bahan bakarnya terlalu banyak (tidak cukup oksigen), dikatakan campuran kaya (*rich*) sehingga pembakaran ini menghasilkan api reduksi.

Adapun persyaratan dari pembakaran yang terjadi secara sempurna antara lain:

- Semua Carbon C yang terdapat di dalam bahan bakar menjadi CO₂ di dalam produk
- Semua Hidrogen H yang terdapat dalam bahan bakar menjadi H₂O di dalam produk.
- Semua Sulfur S di dalam bahan bakar menjadi SO₂ di dalam produk.

Sedangkan pada proses pembakaran yang tidak sempurna akan menghasilkan produk gas monoksida dan air. Gas monoksida yang dihasilkan dari proses pembakaran akan berbahaya bagi makhluk hidup terutama manusia apabila terhirup karena mengandung racun. Proses pembakaran yang tidak sempurna

ini juga menghasilkan kalor yang rendah. Berikut efek dari pembakaran yang tidak sempurna:

- Pembakaran tak sempurna menghasilkan lebih sedikit kalor.
- Lebih boros akan bahan bakar.
- Menghasilkannya gas karbon monoksida (CO) yang bersifat racun karena dapat mencemari udara.
- Polusi udara yang dihasilkan seperti gas CO, NO_x dan SO₂.

Syarat terjadinya pembakaran yang merupakan proses reaksi kimia akan terjadi bila terdapat bahan bakar, oksigen serta sumber nyala atau panas. Ketiga sumber tersebut akan membentuk segitiga pembakaran yang merupakan syarat terjadi pembakaran. Namun terdapat juga proses pembakaran yang tidak membutuhkan sumber nyala atau panas dari luar sistem. Kondisi tersebut disebut dengan pembakaran spontan, dimana panas didapatkan akibat tekanan atau reaksi kimia yang terjadi hasil kontak langsung antara oksigen dengan bahan bakar pada kondisi temperatur yang tinggi di ruang bakar.

2.7.1 Waktu Pembakaran

Agar bahan bakar dapat terbakar sempurna, bahan bakar yang ada di ruang bakar harus berada dalam zona pembakaran pada waktu yang cukup. Hal ini dikarenakan reaksi kimia proses pembakaran membutuhkan waktu tertentu, yang disebut dengan waktu pembakaran.

2.7.2 Temperatur Pembakaran

Temperatur pembakaran bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Temperatur ruang bakar harus lebih tinggi dibandingkan temperatur penyalaan.

2.7.3 Turbulensi

Turbulensi merupakan salah satu hal yang sangat mempengaruhi proses pembakaran. Agar oksigen yang ada pada udara berkontak

langsung dengan bahan bakar, memerlukan turbulensi dengan cara memusarkan aliran udara sehingga membuat udara dan bahan bakar bercampur dengan baik. Campuran bahan bakar dan udara yang merata atau homogen membuat proses pembakaran terjadi dengan sempurna.

Kandungan yang dimiliki oleh bahan bakar yang dapat membentuk reaksi pembakaran dengan oksigen merupakan hidrogen, karbon serta sulfur. Unsur tersebut dapat bereaksi dengan oksigen sehingga menyebabkan reaksi pembakaran (Samlawi, 2017). Reaksi pembakaran yang terjadi adalah sebagai berikut:

Reaksi Pembakaran Karbon (C) sempurna



Reaksi Pembakaran Karbon tidak sempurna



Reaksi pembakaran hidrogen



Reaksi pembakaran sulfur



2.8. Mekanisme Pembakaran

Pada proses pembakaran bahan bakar padat menggunakan suatu mekanisme tertentu. Mekanisme pembakaran bahan bakar padat adalah sebagai berikut:

2.8.1 Pemanasan dan Pengeringan

Pemanasan bertujuan untuk menghilangkan kadar air yang ada pada bahan bakar dengan cara menguapkannya. Pemanasan dan pengeringan dilakukan dengan cara menahan partikel bahan bakar hingga temperatur pengeringan $\pm 105^\circ\text{C}$ di dalam reaktor.

2.8.2 Pirolisis

Proses pirolisis menyebabkan devolatilisasi, dimana bahan bakar yang sudah kering menghasilkan karakteristik yang mudah menguap. Proses pirolisis dilakukan dengan memanaskan bahan bakar tanpa oksigen untuk menghindari oksidasi karbon, hidrogen dan sulfur. Laju pirolisis dipengaruhi oleh kandungan bahan anorganik bahan bakar.

2.8.3 Oksidasi Volatil

Oksidasi dari volatil yang merupakan serangkaian reaksi rantai radikal bebas. Oksidasi volatil dipengaruhi oleh konsentrasi hidroksil (-OH) yang mendorong penyalaan dan perambatan rantai reaksi terjadi secara cepat.

2.8.4 Oksidasi Arang

Oksidasi arang terjadi saat oksigen dari proses pembakaran berkontak dengan permukaan arang, dimana sebagian besar zat volatil sudah dilepaskan.

2.8.5 Pembentukan Emisi

Oksidasi volatil merupakan reaksi yang mempengaruhi pembentukan polutan seperti karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen dioksida (NO₂) yang dilepaskan sebagai emisi ke udara.

2.8.6 Reaksi Bahan Anorganik

Bahan anorganik yang biasanya dinyatakan dalam oksida seperti silikon, aluminium, titanium, besi, dan sebagainya yang berpengaruh terhadap pembentukan endapan terak.

2.8.7 Pembakaran dan Pelepasan Panas

Panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar padat dapat bermanfaat untuk pembangkit listrik tenaga uap, industri kertas, pembakaran semen, dan sebagainya.

2.9. Efisiensi Pembakaran

Pembakaran yang optimal memiliki nilai efisiensi yang tinggi dari proses yang terjadi. Efisiensi pembakaran juga dapat merujuk pada seberapa baik energi yang terkandung dalam bahan bakar saat dikonversi menjadi energi yang berguna. Tingkat efisiensi yang tinggi mengakibatkan semakin rendahnya energi yang terbuang atau energi yang tidak dapat digunakan. CO dan CO₂ merupakan indikator penting dari efisiensi pembakaran. Guo dan Zhong (Guo & Zhong, 2018) menggunakan persamaan berdasarkan kadar CO dan CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran seperti berikut:

$$n = \frac{C_{CO_2}}{C_{CO} + C_{CO_2}} 100\% \dots\dots\dots (2.15)$$

2.10. Udara pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi yang membutuhkan komponen bahan bakar, oksigen serta adanya panas atau nyala api. oksigen yang dibutuhkan dalam pembakaran tentunya diambil dari udara. Udara yang dialirkan kedalam ruang bakar untuk memenuhi kebutuhan komponen pembakaran disebut sebagai udara pembakaran. Udara pembakaran dibagi menjadi tiga yaitu (Bruce G. Miller and Tillman, 2008);

2.10.1 Udara Primer

Udara primer merupakan udara yang memiliki fungsi sebagai media transportasi bahan bakar menuju ruang bakar. Udara primer juga dapat berfungsi sebagai pengering bahan bakar serta menjadi suplai oksigen sebesar 30% dari pembakaran total.

2.10.2 Udara Sekunder

Udara sekunder merupakan udara yang diinjeksi kedalam ruang bakar dengan tujuan untuk memenuhi kadar oksigen dalam ruang bakar serta menciptakan aliran udara yang berputar (turbulen). Udara sekunder yang digunakan biasanya mencapai 70-80% kebutuhan udara pembakaran.

2.10.3 Udara Tersier

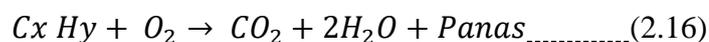
Dalam penggunaan boiler, penggunaan udara sekunder dapat dibagi lagi. Untuk turbulensi tambahan dibutuhkan udara tambahan yaitu udara tersier. Udara tersier merupakan udara yang diberikan pada sudut tajam atau bahkan tegak lurus terhadap nyala api sehingga dapat menyebabkan turbulensi yang cukup agresif.

2.11. *Air Fuel Ratio*

Pembakaran sangat memperhatikan rasio antara bahan bakar dengan udara pembakaran yang digunakan. Perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peran yang penting dalam menentukan hasil suatu proses pembakaran yang mempengaruhi karakteristik api yang dihasilkan. Campuran bahan bakar dengan udara yang stoikiometri dapat menghasilkan kecepatan pembakaran dengan nilai tertinggi. Kecepatan pembakaran merupakan salah satu karakteristik api yang nantinya akan mempengaruhi kualitas api pembakaran (Pranoto, 2012).

Penggunaan rasio pembakaran yang berlebih dapat berdampak pada kadar emisi yang dihasilkan pada saat terjadinya pembakaran. Rasio udara pembakaran yang berlebih dapat mengurangi kadar CO yang ada pada pembakaran serta terjadinya juga pengurangan kadar NO pada hasil pembakaran (Xue et al., 2020)

Pembakaran dapat dibagi menjadi pembakaran sempurna dan tidak sempurna. Pembakaran sempurna merupakan reaksi pembakaran dimana reaktan terbakar dengan oksigen sehingga menghasilkan produk. Pembakaran tidak sempurna merupakan reaksi pembakaran dimana dalam proses pembakaran oksigen yang dibutuhkan dalam proses pembakaran tidak cukup untuk membakar bahan bakar sepenuhnya. Dengan terjadinya reaksi pembakaran yang sempurna akan menghasilkan reaksi seperti berikut:



Pembakaran tidak sempurna akan menghasilkan karbon monoksida yang tidak bereaksi secara sempurna pada proses pembakaran yang terjadi akibat kurangnya kadar oksigen yang ada pada proses pembakaran. Persamaan dalam kalkulasi kandungan rasio bahan bakar dan udara dapat ditulis menjadi (Nursatria A., 2015):

$$AFR = \frac{ma}{mf} = \frac{MaN}{MfNf} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana nilai dari AFR (air fuel ratio) merupakan hasil perbandingan antara massa udara dengan massa bahan bakar yang digunakan pada reaksi pembakaran. Apabila pada nilai actual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran. Reaksi pembakaran juga memiliki rasio antara bahan bakar dengan udara yang dinamakan FAR (*fuel air ratio*) dengan persamaan (Nursatria A., 2015):

$$FAR = \frac{mf}{ma} = \frac{MfNf}{MaN} \dots\dots\dots(2.18)$$

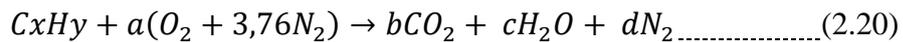
Setelah mengetahui AFR dan FAR maka didapatkan rasio ekivalen pembakaran. Rasio ekivalen adalah perbandingan antara rasio udara bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara bahan bakar (AFR) aktual atau dapat menjadi pembanding rasio bahan bakar udara (FAR) aktual dengan stoikiometrik (Nursatria A., 2015).

$$\phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \dots\dots\dots(2.19)$$

- $\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai kaya bahan bakar (*fuel – rich mixture*)
- $\Phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel –lean mixture*)
- $\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna)

2.12. Pembakaran Stoikiometri

Bahan bakar yang dibakar dan bereaksi secara menyeluruh akan menjadi karbon dioksida serta air. Hasil pembakaran seperti itu diakibatkan karena pasokan udara yang dibutuhkan terpenuhi dan mengalami reaksi yang stoikiometri. Persamaan reaksi kimia pada pembakaran dengan reaksi stoikiometri dapat ditulis menjadi (Cengel dkk., 2010):



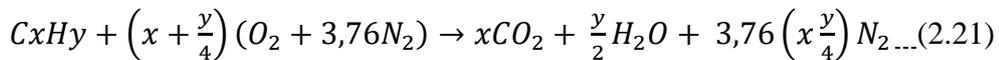
Kesetimbangan C : $x = b$

Kesetimbangan H : $y = 2c \rightarrow c = y/2$

Kesetimbangan O : $2a = 2b + c \rightarrow a = b + c/2 \rightarrow a = x + y/4$

Kesetimbangan N : $2(3,76)a = 2d \rightarrow d = 3,76a \rightarrow d = 3,76(x + y/4)$

Substitusi persamaan-persamaan kesetimbangan di atas ke dalam persamaan reaksi pembakaran C_xH_y menghasilkan persamaan sebagai berikut:



Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mendapatkan pembakaran stoikiometri adalah:

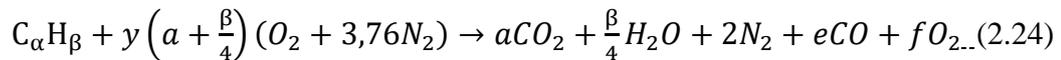
$$m_{O_2} = \frac{m_{atom O_2}}{m_{mol C_xH_y}} \times \text{persentase } C_xH_y \left(\frac{kg}{kg} \text{ bahan bakar}\right) \dots \dots \dots (2.22)$$

Stoikiometri massa yang didasarkan pada rasio udara dan bahan bakar (*air fuel ratio*) untuk bahan bakar hidrokarbon (C_xH_y) adalah sebagai berikut:

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum N_1 M_1)_{air}}{(\sum N_1 M_1)_{fuel}} = \frac{\left(x + \frac{y}{4}\right)M_{O_2} + 3,76\left(x + \frac{y}{4}\right)M_{N_2}}{xM_C + yM_H} \dots \dots \dots (2.23)$$

2.13. Pembakaran Non Stoikiometri

Pembakaran tentunya tidak akan selalu menghasilkan reaksi yang stoikiometri. Dalam hal ini yang dapat mempengaruhi reaksi menjadi stoikiometri adalah kebutuhan udara pada pembakaran. Pembakaran yang kekurangan udara disebut sebagai pembakaran non stoikiometri. Persamaan reaksi pembakaran non stoikiometri dari senyawa hidrokarbon ($C_\alpha H_\beta$) dapat ditulis menjadi (Cengel dkk., 2010):



2.14. Excess Air

Proses pembakaran sulit untuk mendapatkan pencampuran yang sesuai antara bahan bakar dengan udara. Untuk menjadikan reaksi pembakaran yang sempurna, udara perlu diberikan dalam jumlah yang berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran yang sempurna. Udara berlebih merupakan udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah yang lebih besar dari jumlah kebutuhan udara secara teoritis. Produk hasil pembakaran dapat dinyatakan dalam presentase udara berlebih sebagai berikut:

$$\%XSA = \frac{(XO_2)_{prod}}{(XN_2)_{prod}/3,76 - (XN_2)_{prod}} \dots \dots \dots (2.25)$$

Udara berlebih yang didapatkan dari penggunaan udara sekunder selain berfungsi sebagai pembuat aliran turbulen pada ruang bakar, hal ini juga dapat memberikan pengaruh terhadap emisi akibat kadar udara yang digunakan. Udara sekunder juga dapat menurunkan kecepatan fluidasi pada fase padat sehingga dapat meningkatkan waktu tinggal partikel bahan bakar pada ruang bakar. Turbulen yang dibawa udara sekunder dalam fasa fluida dapat meningkatkan perpindahan massa gas dan padat sehingga mendorong partikel terbakar sempurna.

Menurut Zeyu Xue, dkk (2019) udara sekunder dapat mempengaruhi nilai emisi yang dihasilkan pada proses pembakaran. Pembakaran batu bara mengalami penurunan kadar CO pada penggunaan rasio udara sekunder 0% dan 10% dari 119 ppm menjadi 104 ppm dan meningkat menjadi 108 ppm pada rasio udara sekunder 30%. Pengurangan juga terjadi pada emisi NO₂. Dimana kadar NO₂ pada pembakaran batu bara dan co-firing menjadi berkurang pada penggunaan udara sekunder.

2.15. Emisi

Emisi gas buang merupakan produk sisa pembakaran bahan bakar dengan udara di dalam mesin baik itu mesin pembakaran dalam, mesin pembakaran luar ataupun mesin jet yang dikeluarkan pada sistem pembuangan. Produk sisa hasil pembakaran berupa emisi gas buang tersusun antara lain H₂O, CO, NO_x dan juga HC. Beberapa produk dari proses pembakaran dapat dijelaskan sebagai berikut:

2.15.1 Emisi CO

Karbon monoksida merupakan hasil pembakaran yang tidak sempurna dan merupakan bagian dari polutan yang tidak bisa terbakar. Dapat dikategorikan sebagai sebuah angka dari efisiensi pembakaran, walaupun beberapa pembelajaran menjelaskan efisiensi – efisiensi pembakaran yang semakin tinggi dengan emisi karbon monoksida yang semakin tinggi (Ahmad dkk., 2015).

Gas buang karbon monoksida (CO) tidak berbau, tetapi beracun akibat pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Gas CO dapat bereaksi dengan hemoglobin membentuk karbonhemoglobin (CO-Hb) yang selanjutnya menurunkan kemampuan darah dalam membawa oksigen. Seperseribu bagian CO dalam darah akan menyebabkan 50% hemoglobin dalam darah terikat CO (Suganal, 2000).

2.15.2 Emisi NO_x

Nitrogen Oksida (NO) dan Nitrogen Dioksida (NO₂), yang pada umumnya dikenal dengan NO_x dan NO₂. Emisi NO_x mempunyai peran penting dalam reaksi atmosfer yang dapat membentuk partikel-partikel yang berbahaya, berpengaruh pada lapisan ozon dan hujan asam (Ahmad dkk., 2015). Pengaruh gas buang Nitrogen oksida (NO_x) terhadap lingkungan adalah gas yang tidak berbau, tidak berwarna, tetapi beracun yang dihasilkan dari proses pembakaran. Gas NO_x dapat bergabung dengan hemoglobin dan mengganggu penyerapan oksigen dalam darah. NO₂ dapat menyebabkan iritasi di bagian tertentu paru-paru (Suganal, 2000; Nukman dan Hasan Basri, 2007).

2.15.3 Emisi N₂O

N₂O merupakan bagian dari gas efek rumah kaca karena perannya yang begitu potensial dalam penipisan lapisan stratosfer (ozon). N₂O dianggap sebagai penyebab utama dalam bencana efek rumah kaca dan penipisan ozon. Walaupun konsentrasi N₂O di atmosfer tergolong rendah (1100 kali lebih kecil dari CO₂), kekuatan relatif N₂O sebagai penyerap sinar inframerah diyakini sekitar 250 kali lebih besar dari CO₂. Lebih lanjut, N₂O merupakan senyawa yang stabil, yang ditransfer ke lapisan stratosfer dimana secara fotokimia terjadi oksidasi menjadi NO, hal ini menyebabkan lapisan ozon menipis.

2.7.4. Emisi SO_x

Merupakan fakta yang tak dapat dipungkiri bahwa SO_x merupakan penyebab terjadinya hujan asam. Juga, sulfur dan klorin dapat berperan penting dalam korosi komponen ketel uap. Sulfur terdapat pada tumbuhan organik (asam amino dan sulfolipid) dan pada inorganik (sulfat). Konsentrasi sulfur yang organik umumnya konstan tetapi sulfur anorganik dapat bermacam – macam

2.7.5. Emisi HC

Hidrokarbon terbentuk pada pembakaran yang tidak sempurna. Terdiri dari partikel-partikel karbon yang tidak terbakar. Sedangkan gas-gas hidrokarbon adalah senyawa-senyawa karbon dan hidrogen hasil pemecahan bahan organik biomassa yang belum mengalami oksida oksigen lebih lanjut. Seperti karbon monoksida, pembentukan asap dan gas-gas hidrokarbon menyebabkan rendahnya efisiensi pembakaran bahkan jauh lebih rendah dari yang diakibatkan oleh pembentukan karbon monoksida (Erna, 2011).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1. Tempat Penelitian

Pengambilan data pada penelitian ini dilaksanakan di beberapa tempat antara lain:

- a. Persiapan unit torefaksi dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- b. Proses preparasi pelepah kelapa sawit dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- c. Pengeringan pelepah kelapa sawit dilakukan di pelataran Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- d. Pembuatan pelepah kelapa sawit tertorefaksi dilakukan di Pelataran Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- e. Persiapan Unit Pembakaran *Pulverized* dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- f. Preparasi sampel Pelepah Kelapa Sawit Tertorefaksi dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- g. Proses pengujian nilai kalor sampel produk hasil torefaksi Laboratorium Analisis dan Instrumentasi Teknik Kimia Universitas Teknik.
- h. Proses pengujian analisis proksimat sampel produk hasil torefaksi Laboratorium Analisis dan Instrumentasi Teknik Kimia Universitas Teknik.
- i. Proses pengujian nilai ultimate sampel produk hasil torefaksi di Laboratorium Fakultas Pertanian Universitas Lampung.

- j. Proses pengujian hasil emisi dilaksanakan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.1.2. Waktu Pelaksanaan

Waktu pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan November 2022 sampai bulan Juni tahun 2023.

3.2. Alat dan Bahan

Berikut adalah alat dan bahan yang akan digunakan penulis selama melaksanakan penelitian ini:

3.2.1. Alat

Adapun peralatan yang akan digunakan dalam proses penelitian ini antara lain:

- a. Reaktor torefaksi kontinu tipe turbular.

Pada penelitian ini proses torefaksi pada pelepah kelapa sawit dilakukan pada reaktor torefaksi kontinu tipe tubular seperti gambar dibawah.



Gambar 3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe turbular

- b. Bahan bakar yang digunakan sebagai sumber panas pada penelitian ini adalah gas LPG untuk proses torefaksi.



Gambar 3.2 Bahan Bakar LPG

- c. Temperatur Recorder, alat ini digunakan untuk mengukur temperatur reaktor, jaket oli dan bagian dalam reaktor untuk membantu proses pengambilan data. Gambar dibawah menunjukkan contoh temperature recorder yang digunakan.



Gambar 3.3 Temperatur record

- d. Stopwatch, digunakan untuk mengukur lama proses torefaksi sehingga waktu tinggal yang ditetapkan dapat dicapai. Contoh stopwatch yang digunakan ditunjukkan oleh gambar.



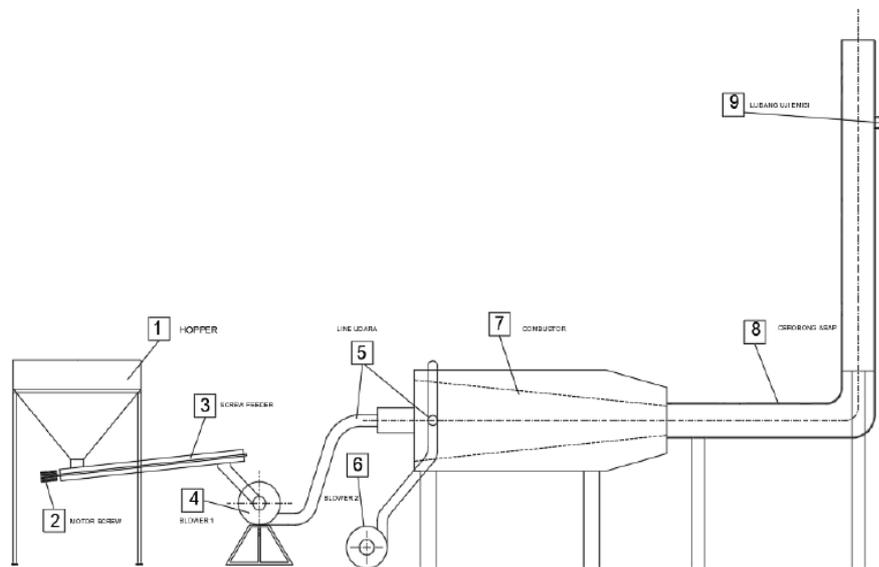
Gambar 3.4 Stopwatch digunakan untuk mengukur waktu tinggal

- e. Gas analyzer, digunakan sebagai alat uji emisi pada sampel produk limbah tandan kosong kelapa sawit yang telah ditorefaksi.



Gambar 3.5 Gas Analyzer Sauermann.

- f. Burner Co-combustion Tipe Pulvuraizer Serbuk, digunakan sebagai alat pembakaran pelepah kelapa sawit yang telah ditorefaksi. Sebagai contoh gambar dari burner tersebut sebagai berikut :



Gambar 3.6 Skema Unit Sistem Pembakaran Serbuk

1. Hopper
Sebagai tempat masuknya bahan bakar.
2. Motor Listrik
Sebagai penggerak screw conveyer.

3. Screw Conveyor
Bagian untuk mentransfer secara kontinyu material bahan bakar.
4. Blower (*Primary Air*)
Membawa bahan bakar menuju ruang bakar dan memberikan suplai oksigen pada ruang bakar.
5. Selang
Sebagai media penghubung blower dan burner.
6. Blower (*Secondary Air*)
Memberikan oksigen tambahan serta membuat aliran turbulensi pada ruang bakar.
7. Burner
Merupakan tempat terjadinya pembakaran.
8. Exhaust Manifold
Digunakan sebagai media pembuangan gas buang pada proses pembakaran.
9. Titik lokasi pengujian emisi
Merupakan titik atau area yang digunakan mengambil sampel pengujian emisi.

3.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah dari produksi kelapa sawit yaitu pelepah kelapa sawit. Pelepah kelapa sawit yang akan digunakan terlebih dahulu dibersihkan lalu dikeringkan.



Gambar 3.7 Limbah Pelepah Kelapa Sawit

3.3. Metode Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan limbah biomassa Pelepah Kelapa Sawit yang telah ditorefaksi dengan ukuran tertentu dilakukan pengujian laboratorium untuk mengetahui kandungan dan komposisi pada produk hasil torefaksi limbah pelepah kelapa sawit. Kemudian setelah di uji pada laboratorium pelepah kelapa sawit yang telah di torefaksi kemudian dilakukan proses pembakaran melalui reaktor tipe pulverized atau sebuk. Berikut tahapan metode penelitian yang akan di laksanakan :

3.3.1 Tahap pertama adalah tahap studi literatur dari beberapa referensi seperti *handbook*, jurnal, browsing internet dan lain-lain. Studi literatur, meliputi:

- Studi tentang potensi energi dari limbah pelepah kelapa sawit pemanfaatannya.
- Studi tentang penelitian-penelitian torefaksi yang telah dilakukan sebelumnya.
- Studi kualitas produk hasil torefaksi yang telah dilakukan sebelumnya.

3.3.2 Pengujian, meliputi:

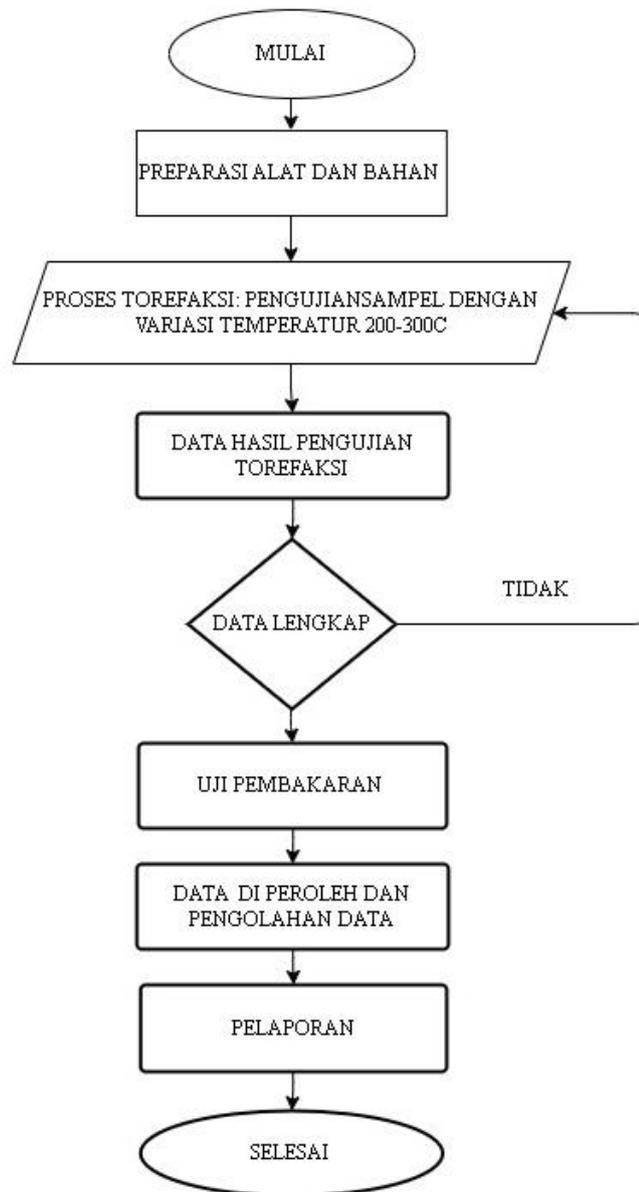
- Persiapan eksperimental set up
- Mencacah limbah pelepah kelapa sawit sampai ukuran seragam sebesar 20 x 20 mm serta menyiapkan cacahan kecil.
- Membuat serbuk dari pelepah kelapa sawit.
- Mengeringkan produk mentah pelepah kelapa sawit dengan suhu lingkungan dengan cara dijemur pada terik matahari selama 3 hari.
- Pengujian pelepah kelapa sawit dengan variasi temperatur 200°C, 225°C 250°C, 275°C dan 300°C dan waktu tinggal 30 menit dengan menggunakan alat torefaksi kontinu.
- Menyiapkan produk hasil torefaksi untuk di buat menjadi bubuk dengan ukuran 20 mesh.

- Menyimpan produk pada tempat yang kedap terhadap udara.

3.3.3 Analisis Produk

- Analisis *proximate* dilaksanakan untuk mendapatkan data berupa karbon tetap (*fixed carbon*), *moisture*, zat *volatile*, dan kadar abu. Analisis nilai *proximate* dilaksanakan dengan menggunakan *thermografimetric analyzer* (TGA) mengikuti prosedur the JIS (Japan Industrial Standar) method. Pengamatan dengan menggunakan TGA dilaksanakan dengan menghitung perubahan berat sampel terhadap waktu dan temperature, yaitu *moisture content* (MC), *volatile meter* (VM), *Fixed carbon* (FC), dan abu (ASH).
- Analisis *ultimate* dilaksanakan untuk menganalisis nilai komponen yang terkandung didalam sampel bahan baku setelah torefaksi dilaksanakan untuk menghitung komponen kimia dilaksanakan dengan menggunakan instrument elemental analyzer. Komposisi elemen kimia atau nilai ultimate yaitu nilai karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S) yang didapatkan dari pengukuran selanjutnya digunakan untuk mencari nilai kalor.(Nilai kalor HHV dan LHV, *energy yield*, *mass yield*, *energy content*, *energy mass yield*)
- Analisis uji Pembakaran (Emisi), pengujian ini dilakukan untuk melihat kandungan emisi pada produk torefaksi limbah tandan kosong kelapa sawit yaitu CO, CO₂, NO_x, dan SO₂.

Penelitian ini dititik beratkan pada pengamatan karakteristik pelepah kelapa sawit yang selanjutnya akan diuji perilaku pembakarannya pada pembakaran jenis serbuk.



Gambar 3.8. Diagram alir Penelitian

3.4. Pengambilan Data

3.4.1. Prosedur Pengujian Torefaksi

Prosedur proses torefaksi pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Mempersiapkan kelengkapan seluruh alat dan bahan pendukung torefaksi, seperti menghubungkan tabung LPG 12 Kg ke

regulator, meletakkan LPG kedalam ember berisi air sirkulasi *cooling char* dan menghubungkan pompa air sirkulasi ke *cooling char* melalui pipa atau selang.

- b. Mempersiapkan sampel mentah pelepah kelapa sawit.
- c. Memasang seluruh *Thermocouple* yang ada pada Reaktor dan *Cooling char* ke Thermocouple Reader 12 channel.
- d. Menghidupkan motor penggerak screw conveyor.
- e. Menyalakan api burner dengan mengatur katup pada regulator LPG.
- f. Menunggu temperatur T1, T2, T3 mencapai temperatur yang diinginkan.
- g. Menjaga temperatur T1, T2, T3 apabila sudah mencapai temperatur yang diinginkan dengan mengatur katup regulator LPG dan tunggu 15 menit – 30 menit sampai temperatur T1, T2, T3 stabil.
- h. Memasukan sampel pelepah kelapa sawit mentah melalui hooper, dan menunggu sampel keluar dengan waktu *residence time* selama 30 menit.
- i. Mendorong pendorong pada *cooling char*, setelah melewati *residence time* dan membuka katup pembuka pada *cooling char*.
- j. Ulangi langkah 6 – 10 untuk variasi temperatur 200 °C, 225 °C, 250 °C, 275 °C dan 300 °C.

Catatan : menjaga temperatur torefaksi dengan mengatur bukaan katup regulator.

3.4.2. Parameter Karakteristik Bahan Bakar Padat

(Nilai Kalor, Uji Proximate dan Uji Ultimate)

Setelah pengambilan sampel produk torefaksi pelepah kelapa sawit dilakukan dengan parameter variasi temperatur dan variasi bentuk kemudian hasil yang didapat kemudian diuji nilai kalor guna mendapatkan parameter temperatur optimal pada proses torefaksi.

Hasil pengujian nilai kalor yang di dapatkan selanjutnya menjadi tolak ukur pada pengujian analisis *proximate* dan analisis *ultimate*. Hal ini berkaitan dengan penggunaan temperatur optimal pada proses pembuatan produk torefaksi yang dilakukan serta efisiensi energi dalam pembuatan produk torefaksi pelepah kelapa sawit.

Analisis Proximate dilakukan untuk mengetahui kompoenen penyusun bahan bakar padat, seperti kandungan karbon tetap (*fixed Carbon*), zat terbang (*volatile matter*), kandungan air dan abu. Pengukuran nilai Proximate dilakukan menggunakan *Thermografimetric Analyzer* (TGA) mengikuti prosedur JIS (*Japan Industrial Standar*). Pengamatan dengan menggunakan TGA dilaksanakan dengan menghitung perubahan berat sampel terhadap waktu dan temperatur, yaitu *moisture content* (MC), *volatile meter* (VM), *Fix carbon* (FC), dan abu (ASH).

Analisis *Ultimate* dilakukan untuk mengetahui komposisi hidrokarbon bahan bakar yang dinyatakan dalam unsur elemen dasar yaitu C, H, O, S sedangkan kelembapan, kandungan anorganik, abu (ash) tidak berkaitan dengan analisis ultimate.

Penelitian ini juga mencangkup seberapa jauh proses torefaksi dapat meningkatkan kualitas sifat-sifat pembakaran dari sampel-sampel pada kondisi *as-received* dengan perhitungan perolehan massa, MY (*mass yield*) dan perolehan energinya, EY (*energy yield*).

3.4.3. Persiapan Sampel Uji Emisi

a. Prosedur Persiapan Sampel Uji

Persiapan sampel uji dilakukan di hangar Teknik Mesin Universitas Lampung. Pada penelitian ini sampel uji tandan pelepah kelapa sawit ditorefaksi dan dilakukan penggilingan lalu

diayak sampai berukuran 100 mesh. Prosedur persiapan sampel uji yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan torefaksi terhadap pelepah kelapa sawit pada temperatur yang telah ditentukan berdasarkan efisiensi energi dalam pembuatan dan nilai kalor yang didapatkan lalu dilakukan penggilingan dengan *ball mill*.
2. Mengayak hasil torefaksi pelepah kelapa sawit dengan ayakan mesh 100.
3. Mengayak batu bara yang akan digunakan dengan ayakan mesh 100.
4. Melakukan pemisahan sampel untuk pengujian dengan variasi pengujian AFR pada udara stoikiometri, excess air 10%

b. Prosedur Pengujian Pembakaran

Sampel bahan bakar siap dan temperatur burner mencukupi, selanjutnya dilakukan pengujian dengan menghidupkan *screw conveyor* dan *blower* sesuai dengan variabel yang telah ditentukan. Laju pengumpanan bahan bakar diatur dengan laju 25 kg/jam. Suplai udara yang digunakan memiliki 4 variasi yaitu *excess air* 0 % (stoikiometri), *excess air* 10 %. *Screw conveyor* yang digunakan mempunyai diameter *pitch* 5 cm, *screw pitch* 6 cm, as *screw* 2,5 cm dan kapasitas hopper 2 kg.

Sedangkan untuk suplai udara menggunakan 2 unit blower yaitu 1 unit blower udara primer yang berfungsi membawa bahan bakar dari *screw conveyor* dan menyediakan oksigen untuk pembakaran dan 1 unit blower udara sekunder yang berfungsi untuk memenuhi kebutuhan oksigen yang diperlukan saat proses pembakaran. *Output* udara sekunder berada di sekeliling ruang bakar dengan tujuan untuk menciptakan turbulensi supaya mendapatkan pencampuran yang baik antara bahan bakar dan udara. Berdasarkan perhitungan teoritis diperoleh kebutuhan udara primer per jam dalam alat ini dinyatakan sebagai berikut:

Tabel 3.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

Laju Pengumpanan Bahan Bakar (kg/jam)	Kebutuhan O ₂ (kg udara/ kg BB)	AFR Stokimetri (kg udara/ kg BB)	<i>Excess Air</i>	<i>AFR Actual</i>	Actual Air Required (kg udara/ jam)	Flow Rate (m ³ udara/ jam)
25	1,753	7,556034483	0%	7,55603	188,900	157,417
			10%	8,31164	207,790	173,159

Untuk menentukan laju masa udara (\dot{m} udara) primer dan (\dot{m} udara) sekunder yang berasal dari air blower dapat diketahui dengan menggunakan persamaan dengan nilai V_b di dapat dari hasil pengukuran kecepatan udara menggunakan alat ukur Anemometer sehingga didapat hasil yang disajikan pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Kebutuhan Udara Primer dan Sekunder

Laju Pengumpanan Bahan Bakar (kg/jam)	Excess Air	Flow Rate (m ³ udara/ jam)	Volume Flow Rate (m ³ /jam)		Vair (m/s)	
			Primer	Secondary	Primer	Secondary
25	0 %	165,699	99	70,69	7,269	5,41
	10 %	182,269		87,26		6,67

Setelah semua parameter laju aliran bakar dan laju aliran udara berjalan sampai ke ruang bakar. Terjadilah proses pembakaran batubara ataupun pada pelepah kelapa sawit tertorefaksi. Mendinginkan proses pembakaran sampai temperatur pembakaran stabil. Ketika temperatur pembakaran sudah stabil pada masing-masing variabel, langkah selanjutnya adalah pengambilan sampel kandungan *gas* berupa SO₂, NO_x, CO dan CO₂ menggunakan *Gas Analyzer* merk Sauermann.

3.4.4. Pengujian Emisi

Pengujian emisi pada produk torefaksi pelepah kelapa sawit dilakukan untuk melihat kandungan CO, CO₂, NO_x, SO₂ pada produk torefaksi

pelepah kelapa sawit ketika dilakukan pembakaran pada tungku jenis serbuk atau *pulverizer*. Selain itu pengujian emisi ini dilakukan untuk menentukan kepatuhan terkait undang-undang polusi yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup Indonesia yang di keluarkan oleh Menteri Lingkungan Republik Indonesia.

Berikut prosedur pengujian dalam pengukuran emisi gas buang pada sistem pembakaran serbuk sebagai berikut:

- a. Menyiapkan alat pengujian mesin coal-combustion pulverized burner dan temperature recorder.
- b. Menghubungkan temperature recorder dengan termokopel yang ada pada pulverized burner, lalu menghidupkannya.
- c. Melakukan pemanasan burner dengan batu bara bongkahan hingga mencapai temperatur 700 °C.
- d. Memasukan bahan bakar serbuk kedalam hopper.
- e. Menyalakan blower primer dan sekunder mengaturnya pada kecepatan angin yang diinginkan menggunakan inverter pada panel instrumen (perubahan kecepatan blower dilakukan dengan merubah frekuensi blower yang telah disesuaikan dengan anemometer).
- f. Menunggu dan memperhatikan pembakaran hingga stabil
- g. Setelah stabil dilakukan pengukuran emisi menggunakan gas analyzer dengan memasukan alat pada bagian exhaust dari alat pulverized burner.
- h. Jika bahan bakar serbuk batu bara sudah terbakar habis, menekan sekali tombol logger dan kemudian menekan tahan tombol rec pada temperature recorder.
- i. Mengulangi prosedur (d) sampai (g) menggunakan sampel uji pada bahan bakar serta variasi AFR yang berbeda.
- j. Mengolah seluruh data yang terkumpul.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pelepah kelapa sawit yang di torefaksi memperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Proses torefaksi merubah sifat fisik pelepah kelapa sawit apabila dilihat dari segi warna, pelepah kelapa sawit mengalami perubahan warna kehitaman seperti arang. Perubahan yang terlihat pada tekstur kekerasan dan keuletan yang menjadikan proses torefaksi pelepah kelapa sawit menjadi lebih lunak dan getas.
2. Hasil pengujian nilai kalor terhadap produk padatan hasil torefaksi dengan variasi temperatur 200°C, 225°C, 250°C, 275°C, dan 300°C menunjukkan bahwa proses torefaksi dapat meningkatkan nilai kalor produk torefaksi pelepah kelapa sawit berkisar antara 4.691 – 6.651 cal/g. Nilai kalor tertinggi produk torefaksi terdapat pada variasi temperatur 300°C dengan nilai kalor sebesar 6.651 cal/g, hal ini menunjukkan bahwa proses torefaksi dapat meningkatkan nilai kalor produk hasil torefaksi pelepah kelapa sawit yang setara dengan batubara subbituminous B.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses torefaksi yang dilakukan pada biomassa pelepah kelapa sawit mengakibatkan perubahan pada massa (*mass yield*) dan energi (*energy yield*) dimana peningkatan temperatur torefaksi mengakibatkan penurunan *mass yield* terbesar yakni pada temperatur 300 °C sebesar 55% dan penurunan *energy yield* tertinggi sebesar 37%.
4. Proses torefaksi pelepah kelapa sawit dengan variasi temperatur 200°C, 225°C, 250°C, 275°C, dan 300°C mempengaruhi hasil pengujian

proximate. Proses torefaksi pelepah kelapa sawit mengakibatkan peningkatan presentase *fixed carbon* (FC), pada temperatur 275°C presentase kandungan FC yang dihasilkan sebesar 16,06%. Presentase FC yang terkandung pada produk torefaksi pelepah kelapa sawit mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan produk mentah yakni 9,76%. Proses torefaksi juga menyebabkan penurunan presentase *volatile matter* (VM) seiring dengan perubahan temperatur torefaksi. Kandungan VM yang dihasilkan meningkat sebesar 70,97% dibandingkan dengan kandungan produk mentah pelepah kelapa sawit yakni sebesar 73,9%.

5. Pengujian Ultimate pada produk torefaksi pelepah kelapa sawit meningkatkan unsur carbon sebesar 4,15%, sedangkan terjadi penurunan pada oksigen dan hidrogen sebesar 1,69% dan 6,17%. Hal ini menjadikan rasio O/C dan terjadi peningkatan rasio H/C.
6. Proses pembakaran pada produk torefaksi pelepah kelapa sawit terjadi peningkatan pembentukan gas CO₂ dari 8.000 ppm pada jenis pelepah kelapa sawit mentah menjadi 34.000 ppm pada PKS TF dan 40.000 ppm pada PKS TF excess 10% serta dapat mereduksi gas CO yang terbentuk pada emisi gas buang hal ini menjadikan produk torefaksi pelepah kelapa sawit memiliki potensi yang tinggi digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang dapat di kombinasikan dengan batubara.
7. Hasil pembakaran produk torefaksi pelepah kelapa sawit serta penambahan *exces air* dapat menurunkan konsentrasi pembentukan NO_x dan SO₂ jika dibandingkan dengan proses pembakaran pelepah kelapa sawit tanpa menggunakan *exces air*.

5.2 Saran

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan maka dalam penelitian ini perlu perbaikan agar dapat menyempurnakan kedepannya. Adapun saran-saran untuk perbaikan yaitu:

1. Perlu adanya preparasi sampel pelepah kelapa sawit dengan ukuran yang lebih seragam guna mendapatkan produk torefaksi yang optimal.

2. Perlu adanya sistem otomatis pengontrol aliran gas LPG guna mengontrol temperatur reaktor torefaksi.
3. Perlu adanya pemanas otomatis pada tungku pembakaran serbuk guna mempermudah tercapainya temperatur kerja pembakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Abinsa, F., Arash Arami-Niya, W.M.A. Wan Daud, J.N. Sahu, & I.M. Noor (2013). Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, 76, 1073–1082. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.038>
- Ahmad, I., Ismail Khan, M., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2015). Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products. *International Journal of Green Energy*, 12(7), 663–671. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.880146>
- Amrul, Hardianto, T., Suwono, A., Pasek, A. D., dan Irhamna, A. (2013). *Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota melalui Torefaksi : Optimasi Temperatur Torefaksi Simultan Berdasarkan Hasil Uji Temperatur Torefaksi Masing-Masing Komponennya. Prosiding SNTTM XIII*, 23–24.
- Tajali, Arief. (2015). *Panduan Penilaian Potensi Biomassa Sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia*. Penabulu Alliance 2015.
- Bach, Q. V., & Skreiberg, O. (2016). Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 665–677. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.014>
- Basu Pabir dan Dhungana A. 2013. *An Investigation Into the Effect of Biomass Particle Size on its Torrefaction*. Chem. Eng.
- Basu Pabir. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory, Second Edition*. Elsevier, Oxford, UK.

- Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third)*. Elsevier Inc. www.elsevierdirect.com/rights
- Bergman P.C.A., A.R. Boersma, J.H.A. Kiel, M.J. Prins, K.J. Ptasinski dan F.J.J.G. Jansen. 2005. *Torrified Biomass for Entrained-Flow Gasification of Biomass*. Report ECN-C-05-026.
- BPS (2019). Statistik Kelapa Sawit Indonesia *Indonesian Oil Palm Statistics* 2019. Katalog: 5504003.
- BPS. (2022) Jumlah Penduduk Pertengahan Tahun (Ribu Jiwa) 2020-2022 Badan Pusat Statistik. <https://www.bps.go.id/indicator/12/1975/1/jumlah-penduduk-pertengahan-tahun.html>
- Erna Yulawati, 2011. Emisi Gas Buang Biomassa Dengan Menggunakan Sistem Pressurized Fluidized Bed Combustion
- Fisher, E. M., Dupont, C., Darvell, L. I., Commandré, J. M., Saddawi, A., Jones, J. M., Grateau, M., Nocquet, T., & Salvador, S. (2012). Combustion and gasification characteristics of chars from raw and torrefied biomass. *Bioresource Technology*, 119, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.109>
- Guo, F., & Zhong, Z. (2018). Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging. *Environmental Pollution*, 239, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.004>
- Hariana, Prida Putra, H., Milkiy Kuswa, F., Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Disain, B., Pengkajian dan Penerapan Teknologi Gedung, B., Puspipetek, K., & -Tangerang Selatan, S. (2020). *Simposium Nasional RAPI XIX Tahun 2020 FT UMS PREDIKSI AWAL KOMPOSISI BLENDING BATUBARA DAN EFB UNTUK MEMINIMALISASI*

POTENSI SLAGGING FOULING PADA CO-FIRING PLTU DENGAN PC-BOILER.

- Irawan, A., Riadz, T., dan Nurmalisa. (2015). Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Kandungan Hemiselulosa dan Uji Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor*, 15(3), 190–195.
- Lau, Hun Sheng., Dkk. (2018). Torrefaction of oil palm fronds for co-firing in coal power plants. *Energy Procedia* 144. 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.010>
- Loh, Soh Kheang (2016). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management xxx* (2016) xxx–xxx. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.081>
- Muhammad Zen, Zuchra Helwani, dan Komalasari. (2019). Bahan Bakar Padat Dari Tandan Kosong Sawit Menggunakan Proses Torefaksi dengan Variasi Suhu dan Waktu Torefaksi. *Jom FTEKNIK Volume 6 Edisi 1 Januari s/d Juni 2019*.
- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015b). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *Fuel*, 156, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>
- Rina Maryenti¹, Komalasari¹, Zuchra Helwani. (2017). Pembuatan Bahan Bakar Padat dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi pada Variasi Suhu Waktu. *Jom FTEKNIK Volume 4 No. 1 Februari 2017*.
- Rosyadi, Imron, dkk. (2018). Pengaruh Peningkatan Temperatur Terhadap Nilai Kalor, Proksimat dan Ultimat Pada Sampah Padat Kota (MSW). *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta Vol. V, No. 1, April 2019*, hal. 120 – 126.

Sekretariat Jendral Dewan Energi Nasional (2021). Laporan Hasil Analisis Neraca Energi Nasional 2021.

Shahzad, K., Saleem, M., Ghauri, M., Akhtar, J., Ali, N., & Akhtar, N. A. (2015). Emissions of NO_x, SO₂, and CO from Co-Combustion of Wheat Straw and Coal Under Fast Fluidized Bed Condition. *Combustion Science and Technology*, 187(7), 1079–1092. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.1002561>

Susanty, W., Dkk (2018). Torrefaction of oil palm frond: The effect of process condition to calorific value and proximate analysis. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. <https://doi:10.1088/1757-899X/345/1/012016>

Susilowati, Komalasari, dan Zuchra Helwani. (2017). Bahan Bakar Padat Dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi; Variasi Suhu dan Ukuran Bahan Baku. Jom FTEKNIK Volume 4 No. 1 Februari 2017.

Tumuluru jaya Shankar, J Richard Hess, Shahab Sokhansanj, Christopher T Wright. 2011. a review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*.

Wahyudi, R., Amrul, A., & Irsyad, M. (2020). Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, 20 (2), 1–8. <https://doi.org/10.24036/invotek.v20i2.706>

Wander, P. R., Bianchi, F. M., Caetano, N. R., Klunk, M. A., & Indrusiak, M. L. S. (2020). Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity. *Energy*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117882>

Xue, Z., Zhong, Z., & Lai, X. (2020a). Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor. *Chemosphere*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124853>

Arifin, Z., Amrul, A., & Irsyad, M. (2021). Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (torrefied biomass). *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(1), 53–60. <https://doi.org/10.24127/trb.v10i1.1468>