

**KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN BATUBARA DAN
BIOMASSA PELEPAH SAWIT TERTOREFAKSI DENGAN
VARIASI *AIR FUEL RASIO* PADA SISTEM *PULVERIZED
COMBUSTION***

(Skripsi)

Oleh

MUHAMMAD HAFID

NPM 1915021051



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN BATUBARA DAN
BIOMASSA PELEPAH SAWIT TERTOREFAKSI DENGAN
VARIASI *AIR FUEL RASIO* PADA SISTEM *PULVERIZED
COMBUSTION***

Oleh

MUHAMMAD HAFID

NPM 1915021051

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN BATUBARA DAN BIOMASSA PELEPAH SAWIT TERTOREFAKSI DENGAN VARIASI AIR FUEL RATIO PADA SISTEM PULVERIZED COMBUSTION

Oleh

Muhammad Hafid

Penggunaan energi fosil dapat membuat cadangan energi fosil semakin menipis. Selain itu timbulnya masalah lingkungan seperti efek Gas Rumah Kaca (GRK) yang diakibatkan dari emisi CO₂, yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara, dari tiap pembangkit listrik maupun pada industri. Diperlukan suatu cara untuk menekan jumlah emisi karbon, salah satunya dengan menggunakan energi alternatif yang ramah lingkungan, terbarukan (*renewable*), serta berkelanjutan (*sustainable*). Salah satunya energi biomassa pelepah kelapa sawit. Tujuan penelitian ini untuk menentukan emisi terbaik dari tiap pengujian bahan dan mengetahui pengaruh penambahan *excess air* pada pembakaran terhadap emisi yang dihasilkan. Penelitian ini diawali dengan menyiapkan pelepah kelapa sawit tertorefaksi, pelepah kelapa sawit mentah dan batu bara dalam bentuk serbuk ukuran mesh 100. Selanjutnya dilakukan pengujian pengaruh *excess air* terhadap emisi pembakaran yang dihasilkan dengan variasi 0% dan 10% untuk masing-masing bahan. Emisi pembakaran diukur menggunakan *gas analyzer*. Hasil penelitian karakteristik emisi terbaik diperoleh pada bahan pelepah sawit tertorefaksi variasi *excess air* 10% dengan nilai CO, CO₂, SO₂, dan NO_x berturut-turut sebesar 3709 ppm. Penambahan *excess air* menyebabkan emisi yang dihasilkan lebih baik ditandai penurunan emisi CO sebesar 22,5 %, penurunan emisi SO₂ sebesar 3,42%, dan penurunan emisi NO_x 2,68 % pada batubara. Pada sampel pelepah penurunan emisi CO sebesar 20,2 %, penurunan emisi SO₂ 3,42%, dan emisi NO_x mengalami penurunan sebesar 13,4 %.

Kata Kunci: Biomassa, Pembakaran, Emisi, *Excess Air*.

ABSTRACT

CHARACTERISTICS OF COAL COMBUSTION EMISSIONS AND PALM FRONT BIOMASS THEOREFACTED WITH VARIATIONS AIR FUEL RATIO ON THE SYSTEM PULVERIZED COMBUSTION

By

Muhammad Hafid

The use of fossil energy can create fossil energy reserves getting thinner. Apart from that, environmental problems arise such as the Green House Gas (GHG) effect resulting from CO emissions₂, which is produced from the coal burning process, from each power plants and industry. A way is needed to reduce the amount of carbon emissions, one of which is by using environmentally friendly, renewable alternative energy (renewable), as well as sustainable (sustainable). One of them is biomass energy palm fronds. The aim of this research is to determine the best emissions from each material test and determine the effect of additions excess air on combustion of the emissions produced. This research began by preparing oil palm fronds torrefacted, raw palm fronds and coal in powder form with a mesh size of 100. Next, the effect was tested excess air of combustion emissions produced with a variation of 0% and 10% for each ingredient. Combustion emissions are measured using gas analyzer. The best emission characteristics research results were obtained from palm frond material torrefacted variation excess air 10% with CO, CO value₂, SO₂, and NO_x respectively 3709 ppm, Addition excess air causing better emissions, marked by a reduction in CO emissions of 22.5%, a decrease in SO emissions₂ of 3.42%, and reduced NO emissions, 2.68% in coal. In the frond samples, CO emissions decreased by 20.2%, SO emissions decreased₂ 3.42%, and NO emissions_x decreased by 13.4%.

Keywords: Biomass, Combustion, Emissions, Excess Air

Judul Skripsi : **KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN
BATUBARA DAN BIOMASSA PELEPAH
SAWIT TERTOREFAKSI DENGAN VARIASI
AIR FUEL RATIO PADA SISTEM
PULVERIZED COMBUSTION**

Nama Mahasiswa : *Muhammad Hafid*

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021051

Program Studi : S1 Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1

Komisi Pembimbing 2



Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 197005012000031001

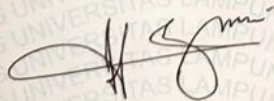


Hadi Prayitno, S.T., M.T.
NIP. 198805142019031012

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
S1. Teknik Mesin.



Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197108171998021003



Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



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



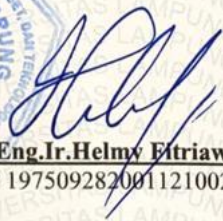
Penguji Utama : Dr. Harmen S.T., M.T



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr.Eng.Ir.Helmy Fitriawan,S.T.,M.Sc.
NIP 197509282001121002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 25 Maret 2024

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

DENGAN INI SAYA MENYATAKAN BAHWA SKRIPSI INI SAYA BUAT
DENGAN USAHA SAYA SENDIRI DAN BUKAN HASIL DARI PLAGIAT
SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 KEPUTUSAN AKADEMIK
UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN KEPUTUSAN REKTOR NO. 13
TAHUN 2019

Bandar Lampung, 19 Juli 2024
Penulis



MUHAMMAD HAFID
NPM. 1915021051

MOTTO

“Saya melakukan yang terbaik yang saya tahu, yang terbaik yang saya bisa, dan saya bermaksud untuk terus melakukannya sampai akhir.”

~Abraham Lincoln

“Learning is not attained by chance, it must be sought for with ardor and attended to with diligence.”

~ Abigail Adams

“Siapa yang bertakwa kepada Allah, niscaya Dia menjadikan kemudahan baginya dalam urusannya. (QS. Al Talaq: 4)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Puji Syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan SKRIPSI ini dengan lancar dan sehat wal'afiat. Salawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada junjungna besar kita nabi Muhammad SAW.

Adapun penulisan SKRIPSI dengan judul “Karakteristik Emisi Pembakaran Batubara dan Biomassa Pelepah Sawit Tertorefaksi dengan Variasi *Air Fuel Rasio* Pada Sistem *Pulverized Combustion*” ini dimaksudkan untuk syarat memperoleh gelar sarjana di Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Berkenaan dengan selesainya SKRIPSI ini, maka penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung sekaligus sebagai Dosen Pembimbing I penulis yang telah memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan viii skripsi ini.
3. Ir. Martinus, S.T., M.Sc sebagai Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Lampung
4. Dr. Amrul, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing I penulis yang telah memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.
5. Hadi Prayitno, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing II penulis yang telah memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.
6. Dr. Harmen S.T., M.T. sebagai Dosen Pembahas yang telah memberikan

penulis saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.

7. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Sarjana Teknik Mesin atas segala ilmu yang bermanfaat, waktu dan tenaga yang diberikan untuk penulis.
8. Bapak Tri Prihatin dan Ibu Siti Nurhayati Selaku Orang tua yang telah memberikan semangat, motivasi serta doa yang tiada putusnya
9. Teman-teman tim penelitian co-firing dan torefaksi, yang telah membantu penyelesaian skripsi ini.
10. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan 2019 yang telah memberikan bantuan dan dukungannya kepada penulis.
11. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Skripsi ini.

Penulis sangat bersyukur karena telah diberikan orang baik yang membantu dalam menyelesaikan kerja praktek dan berdoa semoga Allah S.W.T membalas kebaikannya serta selalu diberkati dan dilindungi oleh-Nya. Akhir kata, penulis sadar bahwasannya laporan ini masih banyak kekurangan. Kritik dan saran yang membangun tentunya sangat kami harapkan demi perbaikan dan kesempurnaan.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Bandar Lampung, Juli 2024

Penulis,

Muhammad Hafid

NPM.1915021051

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Hadimulyo Barat, kota Metro provinsi Lampung pada tanggal 30 Juli 2000, penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan bapak Tri Prihatin dan ibu Siti Nurhayati. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD NEGERI 5 METRO PUSAT hingga tahun 2012, lalu melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP NEGERI 1 KOTA METRO yang diselesaikan pada tahun 2015, kemudian melanjutkan ke pendidikan tingkat atas di SMA NEGERI 3 KOTA METRO yang diselesaikan pada tahun 2018, dan pada tahun 2019 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota bidang Kominfo periode 2020-2021 dan anggota bidang Kesekretariatan periode 2021-2022.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PT. Semen Baturaja (Persero). Baturaja pada tahun 2022 dengan judul laporan “ANALISIS KERUSAKAN *BEARING LOOSE 43PL29 PNEUMATIC SCREW PUMP* DI PABRIK 2 PT SEMEN BATURAJA(Persero) Tbk”. xii Tahun 2022 penulis tergabung dalam tim penelitian torefaksi dengan judul penelitian” KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN BATUBARA DAN BIOMASSA PELEPAH SAWIT TERTOREFAKSI DENGAN VARIASI *AIR FUEL RASIO* PADA SISTEM *PULVERIZED COMBUSTION*”. Di bawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T

DAFTAR ISI

MOTTO	I
SANWACANA	II
RIWAYAT HIDUP	IV
DAFTAR ISI.....	V
DAFTAR GAMBAR.....	VIII
DAFTAR TABEL.....	IX
Daftar Notasi.....	X
I . PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	4
1.3 Manfaat Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
II . TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Biomassa.....	7
2.1.1 Potensi Biomassa Perkebunan Kelapa Sawit	8
2.1.2 Karakteristik Biomassa	9
2.1.3 <i>Upgrading</i> Biomassa.....	11
2.2 Pelepah Sawit.....	12
2.2.1 Karakteristik Pelepah Kelapa Sawit.....	13
2.3 Batu bara.....	14

2.3.1 Batubara sebagai bahan bakar	14
2.3.2 Kelas dan Jenis-jenis Batu bara.....	16
2.4 Pembakaran	19
2.4.1 Pembakaran Stoikiometri	21
2.4.2 Pembakaran Non stoikiometri.....	22
2.4.3 Jenis -Jenis Tungku Pembakaran	22
2.4.4 Mekanisme pembakaran padatan	27
2.5 Udara Pembakaran.....	27
2.5.1 <i>Excess Air</i>	29
2.6 <i>Air Fuel Ratio</i>	30
2.7 Pengaruh udara berlebih pada emisi	31
2.8 Emisi.....	33
2.8.1 Emisi Karbon Monoksida (CO)	34
2.8.2 Emisi Nitrogen Oksida (NO _x)	35
2.8.3 Emisi Sulfur Dioksida (SO ₂).....	36
III . METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	38
3.1.1 Tempat Penelitian.....	38
3.1.2 Waktu Penelitian	39
3.2 Alat dan Bahan.....	39
3.2.1 Alat Utama Penelitian	39
3.2.2 Alat Pendukung penelitian	41
3.2.3 Bahan.....	44
3.3 Metode Pengambilan Data.....	44
3.3.1 Prosedur Persiapan Sampel Uji	45
3.3.2 Prosedur Pengujian.....	45

3.4 Diagram alir penelitian.....	47
V . KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perkembangan luas area dan produksi kelapa sawit 2017-2021.....	8
Gambar 2. 2 Skema sistem fixed bed combustion	23
Gambar 2. 3 Skema sistem fluidized bed reactor	24
Gambar 2. 4 Skema sistem pulverized combustion	26
Gambar 2. 5 Pengaruh temperatur pembakaran terhadap emisi CO.....	35
Gambar 3. 1 Skema alat coal- cumbustion pulverized burner	39
Gambar 3. 2 Gas analyzer E 6000- 5DS	41
Gambar 3. 3 Timbangan Digital B2090.....	42
Gambar 3. 4 Perekam temperatur BTM-4208SD	43
Gambar 3. 5 Ayakan 100 mesh.....	43
Gambar 3. 6 Diagram alir penelitian.....	48
Gambar 4. 1 Emisi CO ₂ dan CO pembakaran stoikiometri	51
Gambar 4. 2 Emisi SO ₂ dan NO _x pembakaran stoikiometri.....	52
Gambar 4. 3 Emisi CO ₂ dan CO Excess Air 10%	53
Gambar 4. 4 Emisi SO ₂ dan NO _x Excess Air 10%	54
Gambar 4.5 Efisiensi Pembakaran Pada Batubara dan pelepah Tertorefaksi Variasi <i>Excess Air</i> 0 dan 10 %.....	55
Gambar 4. 6 Konsentrasi CO dan CO ₂ variasi AFR	56
Gambar 4. 7 Konsentrasi SO ₂ dan NO _x Variasi AFR	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Analisis ultimat torefaksi pelepah sawit.	11
Tabel 2. 2 Analisis proksimat dan ultimat pelepah sawit basis kering	13
Tabel 2. 3 Komponen penyusun pelepah sawit.....	13
Tabel 2. 4 Analisis proximate batu bara sub bituminous.	17
Tabel 2. 5 Analisis ultimat batu bara sub bituminous.....	17
Tabel 3. 1 Spesifikasi bahan.....	44
Tabel 4. 1 Kebutuhan udara pembakaran.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 2 Kebutuhan udara primer dan sekunder	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 3 Data hasil pengujian.....	50

Daftar Notasi

- η : Efisiensi pembakaran (%)
- Φ : Rasio ekivalen
- AFR : Air fuel ratio
- $AFR a$: Air fuel ratio aktual
- $AFR s$: Air fuel ratio stoikiometri
- CCO : Konsentrasi gas karbon monoksida (%)
- CCO_2 : Konsentrasi gas karbon dioksida, (%)
- FAR : Fuel air ratio
- $FAR a$: Fuel air ratio aktual
- $FAR s$: Fuel air ratio stoikiometri
- m : Massa (kg)
- m_a : Massa udara (kg)
- m_f : Massa bahan bakar (kg)
- M_f : Massa molar bahan bakar (kg/kmol)
- N_f : Bilangan mol bahan bakar (kmol)
- M_a : Massa molar udara (kg/kmol)
- \dot{N} : Bilangan mol (kmol)
- m_{O_2} : massa oksigen, kg
- C_xH_y : Bahan bakar hidrokarbon

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Selama ini penggunaan bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi masih menjadi penopang utama penggunaan energi di dunia, baik dari segi energi yang digunakan baik untuk transportasi, industri, dan rumah tangga. Seperti yang kita tahu bahwa penggunaan energi fosil yang terlalu banyak dapat membuat cadangan energi fosil tersebut semakin menipis, selain itu adanya masalah lingkungan akibat adanya penggunaan bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi.

Menurut kementerian ESDM, penggunaan bahan bakar fosil di Indonesia berupa batubara pada tahun 2021 mencapai 133 juta ton, tentu jumlah yang sangat besar. Kebutuhan batubara Indonesia 83% dialokasikan untuk pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan sisanya sebesar 17% dialokasikan untuk sektor non pembangkit seperti pabrik semen, *pulp*, metalurgi, dan lain-lain. Penggunaan batubara dengan jumlah besar inilah yang menjadi penyebab utama masalah lingkungan yaitu timbulnya efek Gas Rumah Kaca (GRK) akibat dari emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara dari tiap pembangkit listrik maupun pada industri yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar.

Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2021-2030 milik perusahaan listrik negara (PLN), emisi Gas Rumah Kaca (GRK) tercatat sebesar 259,1 juta ton CO₂ ada tahun 2021. Jumlah ini diproyeksikan akan terus meningkat sebesar 29,13% pada tahun 2030 menjadi sebesar 334,6 juta ton CO₂. Tentu diperlukan suatu cara untuk menekan jumlah emisi karbon salah satunya dengan menggunakan energi alternatif yang ramah lingkungan, terbarukan (*renewable*), serta berkelanjutan (*sustainable*).

Di Indonesia khususnya banyak sekali energi biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan. Biomassa, sebagai salah satu sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) memiliki potensi yang tinggi untuk dikembangkan. Potensi energi yang berasal dari biomassa (bioenergi) mencapai 32,6 GW, dimana pemanfaatannya baru mencapai 1.895 MW atau sekitar 5,8%. Salah satu strategi percepatan pemanfaatan EBT adalah melalui pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) dan secara masif melalui program *co-firing* di beberapa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan estimasi awal dibutuhkan biomassa sebagai bahan baku PLTU sistem *co-firing* sebesar 9 juta ton/tahun untuk 52 PLTU PLN seluruh Indonesia (Rizqi dkk., 2023).

Salah satu kontribusi energi biomassa terbesar adalah sektor perkebunan kelapa sawit. Luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 14,62 juta hektar pada tahun 2021. Provinsi Lampung sendiri memiliki luas perkebunan kelapa sawit sebesar 192,60 ribu hektar pada tahun 2021 (Badan Pusat Statistik. 2022).

Pelepah kelapa sawit merupakan salah satu biomassa limbah yang cukup banyak dihasilkan dari perkebunan sawit. Umumnya limbah pelepah sawit dibiarkan begitu saja untuk menjadi pupuk alami di perkebunan sawit tersebut, kemudian akan membusuk tanpa ada perlakuan pengolahan lebih lanjut. Tentu hal ini sangat disayangkan mengingat jumlah limbah pelepah sawit yang dipotong dapat mencapai 40-50 pelepah dalam satu pohon dalam kurun waktu satu tahun, dengan bobot pelepah sebesar 4,5 kg berat kering per pelepah. Dalam satu hektar sawit diperkirakan dapat menghasilkan 6400-7500 pelepah per tahun dengan nilai kalor dari biomassa pelepah sawit berkisar 17200 kJ/kg(Susilowati dkk.,2017).

Meskipun memiliki potensi yang cukup besar untuk dijadikan sebagai energi alternatif, hal penting yang perlu juga diperhatikan yaitu sistem pengolahan energi biomassa sebelum digunakan. Untuk itu perlu adanya teknologi yang bisa digunakan untuk mengolah biomassa mentah untuk mencapai *output* energi yang maksimal dari suatu bahan bakar nabati salah satunya dengan proses torefaksi.

Torefaksi merupakan proses yang digunakan untuk membuat bahan bakar padat dari biomassa dengan proses *thermal* menggunakan gas inert atau nitrogen dalam suhu rendah sekitar 200-300 °C, dengan hasil karakteristik yang baik mendekati karakteristik batubara dalam hal nilai kalor, penanganan, pengilingan, dan pendistribusian.

Menurut (Basu, 2013) proses torefaksi dapat meningkatkan nilai kalor dari biomassa tersebut, selain itu energi densitas biomassa yang sudah tertorefaksi

tinggi, kandungan air rendah serta mendapatkan sifat *hidropobik* (tahan air) yang berarti biomassa tersebut telah mendekati karakteristik bahan bakar batubara sub bituminus c.

Melihat potensi tersebut pelepah kelapa sawit tentu sangat layak digunakan sebagai campuran bahan bakar batubara dalam sistem *co-firing* ataupun pengganti batubara sebagai bahan bakar utama yang digunakan pada pembangkit listrik maupun industri lainnya. Untuk mengetahui apakah biomassa pelepah sawit ini layak secara teknis, tidak mengganggu keandalan operasional pembangkit, dan dapat menurunkan emisi gas CO₂ dalam proses pembakarannya, maka dari itu penulis memiliki inisiatif untuk melakukan penelitian tentang karakteristik emisi yang dihasilkan dari pembakaran pelepah sawit mentah, pelepah sawit yang tertorefaksi, dan batubara.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan yang difokuskan selama pelaksanaan kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan emisi CO, CO₂, SO₂, dan NO_x serta efisiensi pembakaran yang dihasilkan pada proses pembakaran pelepah sawit mentah, pelepah sawit tertorefaksi, dan batu bara.
2. Mengetahui pengaruh dari variasi *excess air* terhadap emisi CO, CO₂, SO₂, dan NO_x yang dihasilkan dari proses pembakaran pelepah sawit tertorefaksi dan batubara dengan variasi *excess air* 0% dan 10%.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Melalui penelitian ini dapat mengembangkan pemanfaatan pelepah sawit tertorefaksi sebagai substitusi batu bara.
2. Melalui penelitian dapat menambah wawasan dan upaya untuk meningkatkan pemberdayaan sumber energi terbarukan berbasis biomassa di Indonesia.

1.4 Batasan Masalah

Kajian pada penelitian ini memfokuskan terhadap proses *combustion* batu bara dan biomassa pelepah sawit tertorefaksi. Beberapa batasan pada kajian ini sebagai berikut:

1. Menggunakan bahan baku pelepah sawit tertorefaksi dan pelepah sawit mentah.
2. Jenis batu bara yang digunakan adalah batu bara sub-bituminus B
3. Proses pembakaran menggunakan sistem *pulverized combustion*.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematis penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Pada bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematis penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini terdiri dari teori yang berhubungan dengan penelitian

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini terdiri atas hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, yaitu tempat penelitian, bahan penelitian, peralatan, dan prosedur pengujian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

V. KESIMPULAN DAN SARAN

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

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

LAMPIRAN

Berisi data pelengkap seperti gambar, dan beberapa data pendukung untuk menunjang kredibilitas laporan penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa biasa disebut dengan “*fitomassa*” ataupun “*bioresource*” merupakan bahan yang dapat diperoleh dari tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai energi atau bahan dalam jumlah yang besar. Secara tidak langsung mengacu pada produk yang diperoleh melalui peternakan dan industri makanan. Basis sumber daya meliputi ratusan dan ribuan spesies tanaman, daratan dan lautan, berbagai sumber pertanian, perhutanan, dan limbah residu pada proses industri serta limbah dan kotoran hewan. Tanaman energi yang membuat perkebunan energi skala besar akan menjadi salah satu biomassa yang menjanjikan, walaupun belum dikomersialkan pada saat ini.

Biomassa secara spesifik berarti kayu, rumput napier, rapeseed, eceng gondok, rumput laut raksasa, chlorella, serbuk gergaji, serpihan kayu, jerami, sekam padi, sampah dapur, lumpur pulp, kotoran hewan, dan lain-lain. Biomassa jenis perkebunan seperti kayu putih, poplar hibrid, kelapa sawit, tebu, rumput gajah, dan lain-lain adalah termasuk kategori ini (Susila dkk., 2017).

Sebagai sumber energi yang berkelanjutan dan terbarukan, biomassa terus-menerus terbentuk oleh interaksi CO₂, udara, air, tanah, dan sinar matahari dengan tumbuhan dan hewan. Setelah organisme mati, mikroorganisme

memecah biomassa menjadi bagian-bagian penyusunnya seperti H₂O, CO₂, dan energi potensialnya. Dengan demikian disebut gas rumah kaca netral atau gas rumah kaca netral. Biomassa berasal dari botani (spesies tanaman) atau biologis (limbah hewan atau bangkai) sumber, atau dari kombinasinya (Basu, 2013).

2.1.1 Potensi Biomassa Perkebunan Kelapa Sawit

Salah satu penyumbang energi biomassa terbesar adalah sektor perkebunan kelapa sawit. Luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 14,62 juta hektar pada tahun 2021. Limbah biomassa yang dapat dihasilkan dari pabrik dan perkebunan kelapa sawit antara lain Tandan Buah Kosong (EFB), Kernel Cangkang, Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (POME), Batang dan Pelepah Kelapa Sawit (OPF). Gambar 2.1 merupakan perkembangan luas area dan produksi kelapa sawit 2017-2021(BPS.2021).



Gambar 2. 1 Perkembangan luas area dan produksi kelapa sawit 2017-2021.

2.1.2 Karakteristik Biomassa

Ada beberapa karakteristik khusus yang harus diperhatikan dan dimiliki biomassa untuk digunakan pada proses pembakaran diantaranya:

1. Nilai kalor tinggi

Dalam bahan bakar, faktor yang paling penting adalah nilai kalor dari jenis biomassa. Nilai kalor dari biomassa dapat didefinisikan dengan *Higher Heating Value* (HHV), yang secara dasar kandungan energi pada saat keadaan kering. Bahan bakar biomassa mempunyai nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan batu bara. Komposisi C (*carbon*) dan H (*hydrogen*) cenderung menaikkan nilai kalor sementara O (*oxygen*) mengurangnya. Kadar lignin dan lignoselulosa bahan bakar umumnya memiliki korelasi yang kuat dengan nilai kalor (Nawawi, 2018).

2. Kadar air (*Moisture content*)

Biomassa secara alami banyak mengandung kadar air. Kadar air biomassa dapat berbeda-beda pada rentang yang bermacam-macam, berkisar 10-70%. Kadar air mempengaruhi pembakaran dan volume produksi gas per unit energi. Kadar air yang sangat tinggi dapat menyebabkan persoalan pembakaran dan mengurangi temperatur pembakaran yang mengganggu pembakaran dari hasil reaksi dan sebagai akibat efek kualitas pembakaran.

3. Komposisi kimia

Komposisi kimia dari jenis biomassa yang digunakan sangat penting karena biomassa yang dibakar dalam tungku dapat menimbulkan efek buruk terhadap masa pakai dan pengoperasian boiler seperti terjadinya *slagging*. *Slagging* inilah yang tidak diinginkan karena akan mengurangi efisiensi perpindahan panas boiler dan dapat menyebabkan banyak masalah operasional boiler. Kadar abu mencerminkan banyaknya mineral dalam batubara dan secara tidak langsung mencerminkan jumlah nilai kalor dari batubara. Bila kadar abu tinggi maka nilai kalor rendah (World Coal Institute, 2009).

4. Pertumbuhan yang menguntungkan dan keamanan pasokan

Untuk keberlangsungan bahan bakar perlu pemilihan biomassa yang akan digunakan dalam proses pembakaran, hal ini dapat dilihat dengan memperhatikan aspek pertumbuhan biomassa dalam hal keuntungan dan keamanan pasokan dimana biomassa tersebut dapat diproduksi dalam jumlah yang besar secara berkelanjutan. Hal inilah yang menjadi pertimbangan bahwasannya tidak semua biomassa mampu untuk diproduksi secara berkelanjutan dikarenakan sulitnya pasokan bahan mentah biomassa tersebut. Salah satunya limbah pelepah sawit yang memiliki potensi cukup besar untuk menjamin keamanan pasokan energi biomassa.

2.1.3 Upgrading Biomassa

Peningkatan kualitas atau *upgrading* biomassa ini dilakukan untuk membuat biomassa mampu bersaing dengan bahan bakar lain seperti batu bara. Salah satu metode yang bisa digunakan yaitu dengan cara torefaksi. Torefaksi yaitu teknologi yang menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik yang baik mendekati karakteristik batu bara dalam hal nilai kalor, penanganan, pengilangan, pendistribusian. Torefaksi memiliki potensi untuk meningkatkan daya saing biomassa sebagai suatu energi yang terbarukan melalui suatu proses *thermal* menggunakan gas *inert* atau nitrogen pada suhu rendah sekitar 200-300 °C. Keuntungan yang diperoleh dari proses ini adalah nilai kalor atau energi densitas yang tinggi, rasio atom O/C, H/C dan kandungan air rendah, serta tahan terhadap air atau hidrofobik (Basu, 2013). Tabel 2.1 merupakan contoh dari analisis proksimat torefaksi biomassa yang pernah dilakukan (Susilowati dkk., 2017)

Tabel 2. 1 Analisis proksimat torefaksi pelepah sawit (Susilowati dkk., 2017).

Analisis Proksimat	Nilai	
	Bahan Baku	Produk
Kadar air (%)	8,23	1,81-3,25
Kadar Volatil (%)	68,45	40,95-63,48
Kadar <i>fixed carbon</i> (%)	19,87	28,62-51,53
Kadar abu (%)	3,45	4,54-6,13

Dapat dilihat pada tabel diatas, nilai kalor pada biomassa pelepah sawit mentah yaitu sebesar 16385 kJ/kg dan naik menjadi 19513-22684 kJ/kg. Begitu pula dengan kandungan karbon tetap pada biomassa mentah naik dari 19,87% menjadi 28,6-51,53%.

Selain itu, kadar air pelepah sebesar 8,23% dan setelah ditorefaksi kadar air yang terkandung di pelepah sawit turun menjadi 1,81-3,25%, dengan hasil ini tentunya hal ini menjadi bukti bahwasannya torefaksi dapat di gunakan untuk membuat kualitas biomassa semakin baik.

2.2 Pelepah Sawit

Pelepah sawit merupakan salah satu biomassa limbah yang cukup banyak dihasilkan dari perkebunan sawit. Dari semua biomassa sawit yang ada, sebanyak 70% merupakan pelepah pohon sawit, sedangkan tandan buah kosong mencapai 10% dan batang sawit mencapai 5%. Umumnya limbah pelepah sawit dibiarkan begitu saja membusuk tanpa ada perlakuan pengolahan lebih lanjut.

Jumlah pelepah sawit yang dipotong dapat mencapai 40-50 pelepah/pohon/tahun dengan bobot pelepah sebesar 4,5 kg berat kering per pelepah. Dalam satu hektar sawit diperkirakan dapat menghasilkan 6400-7500 pelepah per tahun dengan nilai kalor dari biomassa pelepah sawit berkisar 17200 kJ/kg (Simanihuruk dkk., 2008).

2.2.1 Karakteristik Pelepah Kelapa Sawit

Studi pada karakterisasi awal limbah kelapa sawit biomassa memiliki potensi cukup tinggi untuk digunakan sebagai bahan baku torefaksi untuk proses pembakaran.

Berikut adalah tabel hasil analisis proksimat dan ultimat dan tabel komposisi zat penyusun pelepah sawit yang dilakukan (Atnaw dkk., 2011) disajikan pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3

Tabel 2. 2 Analisis proksimat dan ultimat pelepah sawit basis kering (Atnaw dkk., 2011)

Analisis Proksimat	Nilai	Analisis Ultimat	Nilai
Bahan Volatil (VM)	53%	C	42,55%
Karbon Tetap (FC)	41%	H	5,48%
Abu	6%	N	2,18%
<i>Density</i>	712,8 kg m ⁻³	S	0,11%

*Semua nilai proksimat dan ultimate dalam basis kering

Tabel 2. 3 Komponen penyusun pelepah sawit (Atnaw dkk., 2011)

Komponen	Nilai
Selulosa	49,8 %
Hemisellulosa	23,5 %
Lignin	20,5 %
Abu	2,4 %

2.3 Batu bara

2.3.1 Batubara Sebagai Bahan Bakar

Batu bara adalah salah satu jenis bahan bakar fosil yang umum digunakan. Secara umum, batu bara adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, terutama sisa-sisa tumbuhan. Pembentukan batu bara dimulai pada zaman karbon dikenal sebagai zaman batu bara pertama yang berlangsung antara 360 juta tahun yang lalu. Kualitas setiap endapan batubara ditentukan oleh suhu dan tekanan serta lamanya waktu pembentukan, yang disebut sebagai kematangan organik (World Coal Institute, 2009).

Unsur utama yang terkandung dalam batu bara adalah karbon, hidrogen, dan oksigen. Namun, batu bara juga dapat mengandung unsur-unsur lain dalam jumlah yang bervariasi tergantung pada jenisnya. Batu bara merupakan batuan organik yang memiliki sifat fisik dan kimia yang kompleks. Batu bara dapat ditemui dalam berbagai bentuk, seperti lignit, sub-bituminus, bituminus, dan antrasit, yang masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda. Analisis unsur batu bara dapat memberikan rumus formula empiris yang mencerminkan komposisi kimianya, perlu dicatat bahwa rumus formula tersebut mewakili komposisi kimia rata-rata dari batu bara jenis tertentu dan dapat bervariasi antara deposit batu bara yang berbeda.

Batu bara masih menjadi sumber energi yang utama dalam pembangkit listrik di dunia. Sebagai bahan bakar fosil termurah dan melimpah

tersebar di seluruh dunia, membuat 41% pembangkit energi dunia menggunakan batu bara sebagai sumber energinya. Batu bara juga digunakan dalam industri baja, produksi semen, bahan kimia seperti pupuk, aluminium, kapur, dan batu bata, dan sebagainya.

Batu bara menempati peringkat kedua sebagai sumber bahan bakar yang paling banyak digunakan setelah minyak. Sedangkan dalam dunia industri, batu bara menjadi bahan bakar favorit yang digunakan untuk pembangkit tenaga industri. Jenis batu bara yang paling banyak digunakan di dunia adalah lignit, sub bituminous, dan bituminous. Batu bara dapat menjadi sarana untuk memelihara dan memperkuat pertumbuhan ekonomi dan industri pada suatu negara.

Namun batu bara memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, terutama emisi CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. Oleh sebab itu peningkatan teknologi pemrosesan batu bara diperlukan untuk mengurangi dampak negatif yang dihasilkan.

Efisiensi termal pembangkit listrik yang menggunakan batu bara dalam prosesnya perlu ditingkatkan dengan melakukan perbaikan desain pembangkit batu bara serbuk dan pengembangan teknologi pembakaran yang baru. Dengan demikian kenaikan efisiensi termal diharapkan dapat menekan emisi CO₂ yang ditimbulkan.

2.3.2 Kelas dan Jenis-Jenis Batu Bara

Karakteristik batu bara akan digunakan dalam mengklasifikasikan peringkat batu bara. Berikut merupakan klasifikasi batu bara secara umum berdasarkan peringkat batu bara dari yang terendah hingga yang tertinggi.

1. Lignit

Lignit atau yang dikenal dengan batu bara coklat merupakan jenis batu bara muda dengan kandungan energi yang paling kecil, sifatnya rapuh, relatif lembab dan seperti tepung. Dengan nilai kalor 9204-19246 kJ/kg membuat lignit menjadi jenis batu bara dengan peringkat terendah. Lignit mempunyai kandungan karbon terendah dan kadar air tertinggi dari semua jenis batu bara. Dengan abu yang dihasilkan selama proses pembakaran hingga 50%, lignit memiliki kandungan volatil yang paling tinggi membuat penggunaan lignit akan menghasilkan polusi udara dengan emisi yang tinggi.

2. Sub Bituminous

Batu bara sub bituminous mempunyai tekstur yang keras dan kuat hingga lunak dan rapuh. Batubara ini banyak digunakan dalam pembangkit tenaga uap dan industri. Pembakaran batubara sub bituminous menghasilkan abu yang sifatnya lebih basa dibandingkan dengan hasil pembakaran batubara jenis lain.

Emisi karbon monoksida hasil pembakaran batubara sub bituminous dapat ditekan dengan cara menaikkan jumlah udara pada saat proses pembakaran berlangsung.

Berikut pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 berturut turut menunjukkan karakteristik dan analisis ultimat dari batu bara sub bituminous (Santos, 2010).

Tabel 2. 4 Analisis proksimat batu bara sub bituminous. (Santos, 2010).

Analisi Proksimat	Nilai
Kadar air	2,6 %
Volatil	41,8 %
Karbon tetap	54,1 %
Abu	1,5 %

*Semua nilai proksimat dalam basis basah

Tabel 2. 5 Analisis ultimat batu bara sub bituminous (Santos, 2010)

Analisis Ultimat	Nilai
C	75,3 %
H	5,4 %
O	15,6 %
N	1,8 %
S	0,4 %

*Semua nilai analisis ultimat dalam basis kering

3. Bituminous

Bituminous mengandung 68-86% unsur Karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya. Kelas batu bara yang paling banyak ditambang di Indonesia, tersebar di pulau sumatera, kalimantan dan sulawesi. Batu bara yang terdiri dari banyak lapisan tipis ini memiliki nilai kalor hingga tiga kali dari nilai kalor lignit, yaitu dengan nilai kalor sebesar 6.100-8.300 kcal/kg. Batu bara jenis ini biasanya digunakan untuk menghasilkan listrik dan digunakan sebagai bahan bakar dalam industri baja maupun besi.

4. Antrasit

Antrasit merupakan jenis batu bara yang tertua sehingga dianggap sebagai batuan metamorf batu bara dengan peringkat tertinggi. Cirinya warna hitam berkilauan (luster) metalik, mengandung antara 86-98% unsur karbon (C) dengan kadar air kurang dari 8%. Pembakaran antrasit dianggap yang paling bersih dibandingkan dengan jenis batu bara yang lain, dimana panas yang dihasilkan lebih tinggi dan asap yang dihasilkan lebih sedikit.

Batu bara mengandung unsur utama seperti, karbon, hydrogen, oksigen, nitrogen, belerang yang jumlah bervariasi. Elemen-elemen ini adalah bagian dari susunan kayu juga. Namun, komponen penting dari kayu adalah bahan yang mudah menguap dengan persentase yang bervariasi, tergantung pada jenis kayu, usia, dan lokasi.

2.4 Pembakaran

Proses pembakaran adalah reaksi oksidasi yang terjadi dengan sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator, menghasilkan nyala dan panas. Bahan bakar merupakan substansi yang melepaskan panas saat mengalami oksidasi dan umumnya mengandung unsur-unsur seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Oksidator seperti udara adalah substansi yang mengandung oksigen yang akan bereaksi dengan bahan bakar. Pada pembakaran, terjadi fenomena-fenomena seperti interaksi proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan kimia, perpindahan panas, perpindahan massa, dan gerakan fluida (Mahandri, 2010).

Proses pembakaran aktual dipengaruhi oleh 5 faktor (Budiman.,2001), yaitu:

1. Pencampuran udara dan bahan bakar dengan baik.
2. Kebutuhan udara untuk proses pembakaran.
3. Temperatur pembakaran.
4. Lamanya waktu pembakaran yang terkait dengan laju pembakaran.
5. Berat jenis bahan bakar yang akan dibakar.

Pencampuran udara dan bahan bakar yang baik dalam pembakaran aktual umumnya tidak dapat dicapai secara sempurna, namun dapat didekati melalui penambahan udara berlebih (*excess air*). Penambahan udara berlebih harus dilakukan dengan nilai minimum karena jika terlalu banyak, dapat meningkatkan kerugian energi dalam pembakaran.

Tingkat kesempurnaan pembakaran dipengaruhi oleh beberapa variabel berikut:

a. Temperatur

Agar proses pembakaran suatu bahan bakar dapat terjadi, temperatur zat tersebut harus mencapai suatu nilai tertentu yang cukup untuk memulai reaksi pembakaran. Nilai temperatur ini bervariasi tergantung pada komposisi kimia dari zat tersebut, dan sering disebut sebagai temperatur penyalaan. Penting untuk menjaga temperatur ruang bakar agar campuran udara dan bahan bakar mencapai temperatur penyalaan sehingga proses pembakaran dapat terjadi dan bahan bakar dapat terbakar.

b. Turbulensi

Oksigen dalam udara yang mengalir ke ruang bakar berpotensi keluar tanpa bersentuhan dengan bahan bakar. Untuk mencegah hal ini, teknik pemusaran aliran udara digunakan. Turbulensi udara dapat menciptakan pencampuran yang efektif antara udara dan bahan bakar, memungkinkan terjadinya pembakaran yang optimal. Tiga faktor tersebut harus dijaga agar tidak menimbulkan dampak negatif, seperti:

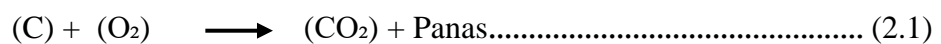
- a) Jika suhu di ruang bakar lebih rendah dari suhu penyalaan campuran udara dan bahan bakar, maka campuran tersebut tidak akan terbakar dengan baik, bahkan dapat menyebabkan padamnya nyala api, yang sering disebut sebagai kegagalan menyala.
- b) Apabila pasokan udara terlalu kuat dan tidak sesuai dengan kebutuhan, turbulensi yang terjadi mungkin tidak optimal. Ukuran partikel bahan bakar yang terlalu besar dapat menghasilkan proses pembakaran yang tidak sempurna. Akibatnya, bahan bakar yang belum terbakar di ruang bakar dapat terbakar di luar zona pembakaran.

c. Waktu

Pembakaran merupakan suatu proses kimia yang memerlukan waktu untuk menyelesaikan reaksi. Pada setiap tahap pembakaran, penting untuk menjaga agar bahan bakar tetap berada dalam kisaran pembakaran di dalam ruang bakar selama periode yang mencukupi. Tujuan dari langkah ini adalah memastikan bahwa bahan bakar dapat terbakar secara optimal, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi dari proses pembakaran.

2.4.1 Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri menggambarkan persyaratan reaksi pembakaran yang sepenuhnya terpenuhi pada atau di atas kebutuhan udara stoikiometris untuk mencapai pembakaran yang sempurna. Pembakaran yang dapat mengonsumsi semua komponen bahan bakar secara efisien disebut sebagai pembakaran sempurna, dan kebutuhan udara yang diperlukan untuk mencapai pembakaran sempurna disebut kebutuhan udara stoikiometri. Proses pembakaran stoikiometri yang sederhana terjadi ketika karbon dan oksigen terbakar, seperti yang diperlihatkan di bawah ini:



Campuran stoikiometri terjadi apabila jumlah oksigen dalam campuran yang tepat untuk bereaksi dengan C, H, S, membentuk CO₂, H₂O, dan SO₂ (Wiharjo & Danu, 2011).

2.4.2 Pembakaran Non Stoikiometri

Pembakaran non-stoikiometri adalah proses pembakaran di mana perbandingan antara bahan bakar dan oksigen tidak sesuai dengan perbandingan stoikiometri ideal yang diperlukan untuk pembakaran sempurna. Pembakaran non-stoikiometri ini dapat memiliki dampak negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia. Emisi dari pembakaran non-stoikiometri, seperti NO_x , CO, dan HC, dapat menyebabkan polusi udara, membahayakan kualitas udara, serta memiliki efek negatif pada perubahan iklim dan kesehatan manusia.

Ada dua kondisi utama pembakaran non-stoikiometri yaitu:

1. Pembakaran berlebihan (*excess air*)

Ini terjadi ketika jumlah oksigen yang digunakan dalam pembakaran lebih banyak daripada yang diperlukan secara stoikiometri

2. Pembakaran kekurangan (*Incomplete Combustion*)

Ini terjadi ketika jumlah oksigen yang digunakan dalam pembakaran lebih sedikit daripada yang diperlukan secara stoikiometri. Pembakaran dengan kekurangan oksigen dapat menghasilkan produk samping seperti karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon tak terbakar (HC).

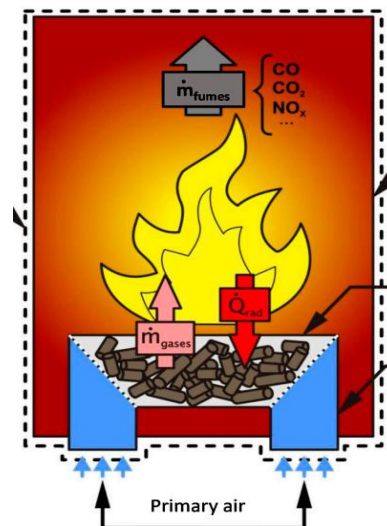
2.4.3 Jenis -Jenis Tungku Pembakaran

Proses pembakaran di industri mempunyai banyak metode yang biasa digunakan untuk memenuhi kebutuhan industri, dan biasanya jenis

tungku pembakaran untuk membakar batu bara ataupun biomassa pun berbeda menyesuaikan kebutuhan dari industri tersebut. Ada 3 jenis tungku yang biasa digunakan di dalam industri antara lain:

1. *Fixed bed combustion*

Salah satu metode pembakaran di mana batu bara, dengan ukuran antara 3-50 mm, ditempatkan di atas perapian. Udara yang telah dipanaskan sebelumnya disalurkan ke dalam perapian. Sistem *fixed bed combustion* ini menggunakan kontak langsung antara bahan bakar dan udara untuk proses pembakaran. Skema sistem pembakaran *fixed bed combustion* dapat dilihat pada Gambar 2.2.

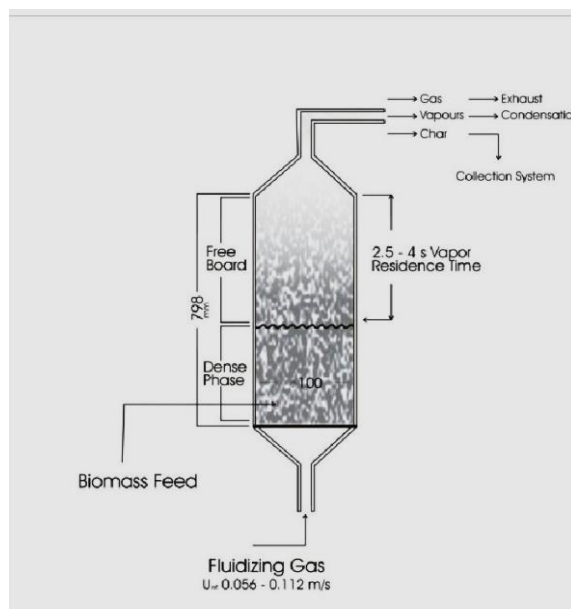


Gambar 2. 2 Skema sistem *fixed bed combustion* (Gomez dkk., 2018)

2. *Fluidized bed combustion*

Metode pembakaran di mana bahan bakar yang telah diolah secara khusus agar dapat berperilaku seperti fluida. Dalam sistem ini, udara

dialirkan sehingga menciptakan aliran udara yang cukup kuat untuk menjaga bahan bakar tetap berada dalam keadaan terapung. Hal ini menciptakan kondisi di mana pembakaran terjadi di antara partikel bahan bakar yang berada dalam suspensi udara. Biasanya pada *fluidized bed combustion* diperlukan media lain seperti pasir silica yang berguna sebagai media pengaduk dan juga sebagai media pengahantar panas ke bahan bakar dalam proses pembakaran. Skema sistem pembakaran *fluidized bed reactor* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Skema sistem *fluidized bed reactor* (Ali dkk., 2014).

3. *Pulverized fuel combustion*

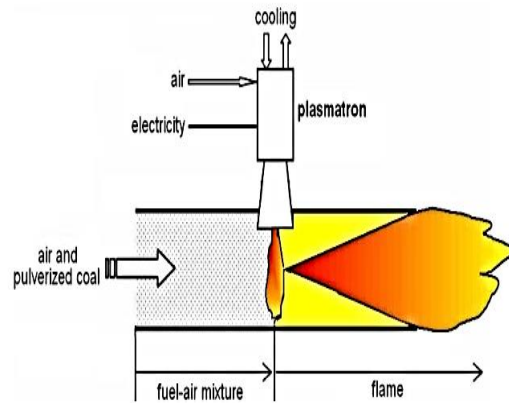
Pulverized fuel combustion adalah metode pembakaran di mana bahan bakar yang telah dihaluskan menjadi serbuk sangat halus

berukuran 200 mesh, kemudian diinjeksikan ke dalam ruang bakar menggunakan sistem pneumatik. Serbuk bahan bakar ini dicampur dengan udara dan terbakar dalam kondisi yang sangat efisien.

Metode ini umumnya digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap, di mana pembakaran serbuk bahan bakar yang sangat halus meningkatkan efisiensi pembakaran dan transfer panas. Pembakaran serbuk secara umum melibatkan reaksi fisika dan kimia yang kompleks, perpindahan panas dalam pembakaran serbuk terjadi secara konduksi, konveksi dan radiasi. Karakteristik dari bahan bakar, ruang pembakaran, temperatur dan aerodinamis juga ikut berpengaruh besar dalam pembakaran serbuk. Dalam pembakaran serbuk keseimbangan dari pengoksidasi dan udara sekunder akan mempengaruhi efisiensi pembakaran dan polutan yang terbentuk akibat pembakaran.

Pembakaran serbuk pada biomassa harus memperhatikan beberapa hal dalam penggunaannya seperti temperatur, waktu tinggal dan campuran bahan bakar lain yang digunakan bersama dengan biomassa, hal ini karena aspek-aspek tersebut mempengaruhi proses pembakaran serbuk terjadi pada temperatur pembakaran yang tinggi berkisar 1600°C dan memiliki waktu tinggal pembakaran yang pendek. Pembakaran serbuk memiliki kelebihan seperti efisiensi yang tinggi bagi sistem pembangkit, biaya operasional yang murah dan kontrol bahan yang lebih mudah (Nordgren, 2011).

Secara relatif terhadap jenis pembakaran lainnya, metode pembakaran *pulverized burner* memiliki ketergantungan yang minim terhadap karakteristik batu bara. Meskipun ada beberapa instalasi yang membatasi penggunaan jenis batu bara tertentu, namun pada umumnya hampir semua jenis batu bara dapat digunakan dalam sistem *pulverized burner* dengan desain sistem yang sesuai. Skema sistem pembakaran *pulverized combustion* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Skema sistem *pulverized combustion*

(Gelashvili dkk., 2018)

Ketiga metode pembakaran tersebut memiliki karakteristik dan kegunaan yang berbeda-beda tergantung pada aplikasinya.

2.4.4 Mekanisme Pembakaran Padatan

Secara umum, proses pembakaran padatan melibatkan serangkaian tahapan, termasuk pemanasan, pengeringan, devolatilisasi, dan pembakaran arang. Saat tahap pengeringan, kadar air pada bahan bakar padat berkurang, diikuti oleh devolatilisasi yang merupakan proses pelepasan gas yang mengandung volatil. Komposisi gas yang dilepaskan selama devolatilisasi bervariasi tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan, mencakup CO, CO₂, CH₄, dan H₂.

Setelah devolatilisasi, terjadi oksidasi pada bahan bakar padat, yaitu arang. Laju pembakaran arang dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen, temperatur gas, dan porositas arang. Peningkatan konsentrasi oksigen dalam gas dapat meningkatkan laju pembakaran bahan bakar padat. Di sisi lain, temperatur pembakaran yang lebih tinggi dapat menyebabkan waktu pembakaran padatan menjadi lebih singkat (Pengmei dkk., 2004).

2.5 Udara Pembakaran

Udara pembakaran merupakan komponen penting dalam proses pembakaran yang terdiri dari bahan bakar, oksigen, dan panas atau nyala api. Oksigen yang diperlukan untuk pembakaran diperoleh dari udara. Udara yang masuk ke dalam ruang bakar untuk memenuhi kebutuhan pembakaran disebut sebagai udara pembakaran.

Secara umum, udara pembakaran dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Udara primer

Udara primer berfungsi sebagai media transportasi bahan bakar dari penggilingan (*mill*) menuju ruang bakar. Selain itu, udara primer juga berperan sebagai pengering bahan bakar. Udara primer memberikan suplai oksigen sekitar 30% dari total pembakaran.

2. Udara sekunder

Udara sekunder disuntikkan ke dalam ruang bakar dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan kadar oksigen di dalam ruang bakar. Udara sekunder juga membantu menciptakan aliran udara yang berputar (*turbulen*) dalam ruang bakar.

3. Udara tersier

Dalam penggunaan boiler, penggunaan udara sekunder dapat dibagi lagi. Udara tersier diperlukan untuk menciptakan turbulensi tambahan. Udara tersier diberikan pada sudut tajam atau bahkan tegak lurus terhadap nyala api untuk menghasilkan turbulensi yang lebih agresif.

Penggunaan udara primer, sekunder, dan tersier dalam pembakaran bertujuan untuk memastikan suplai oksigen yang cukup, menciptakan pencampuran yang baik antara bahan bakar dan udara, serta memaksimalkan efisiensi pembakaran.

2.5.1 *Excess Air*

Excess air dalam pembakaran batubara merujuk pada jumlah udara yang *disupply* ke dalam ruang bakar melebihi jumlah yang diperlukan secara stoikiometri untuk pembakaran sempurna batubara. Dalam konteks ini, stoikiometri mengacu pada perbandingan optimal antara udara dan bahan bakar yang diperlukan untuk mencapai pembakaran penuh tanpa ada sisa oksigen yang tersisa.

Excess air sering diukur sebagai persentase perbedaan antara jumlah udara yang sebenarnya diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan jumlah udara yang diperlukan secara teoritis. Jika jumlah udara yang digunakan lebih besar dari yang seharusnya, kita katakan ada *excess air*.

Kelebihan udara dapat memiliki dampak negatif terhadap efisiensi pembakaran. Meskipun kelebihan udara dapat membantu mencegah pembentukan polutan tertentu, seperti karbon monoksida (CO).

Di sisi lain, jika jumlah oksigen yang berlebih (ditandai dengan *excess air*) semakin banyak, maka akan semakin banyak pula energi panas yang terbuang karena diserap oleh *excess air* tersebut. Kerugian ini juga dikenal sebagai kerugian panas atau *heat lose* (Hutomo, 2015).

Pengaturan *excess air* dalam pembakaran batubara sering kali menjadi pertimbangan penting untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi dan kontrol emisi.

2.6 Air Fuel Ratio

Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam beberapa parameter yang lazim antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*), FAR (*Fuel Air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen (ϕ).

1. Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio*/AFR) Rasio ini merupakan parameter yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau.

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai:

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{M_a \dot{N}_a}{M_f \dot{N}_f} \quad (2.4)$$

2. Rasio Bahan Bakar-Udara (*Fuel Air Ratio*/FAR) AFR dan FAR dapat juga dinyatakan dalam perbandingan volume. Untuk bahan bakar gas perbandingan volume lebih sering dipergunakan karena sebanding dengan perbandingan jumlah mol. Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari AFR yang dirumuskan sebagai berikut:

$$FAR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{M_f \dot{N}_f}{M_a \dot{N}_a} \quad (2.5)$$

3. Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio*, ϕ) Rasio ini termasuk juga rasio yang umum digunakan. Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometrik.

$$\Phi = \frac{AFR_S}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_S} \quad (2.6)$$

- $\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran 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)

2.7 Pengaruh Udara Berlebih Pada Emisi

Penggunaan udara sekunder dalam pembakaran memiliki beberapa fungsi penting. Selain sebagai pembuat aliran turbulen di dalam ruang bakar, udara sekunder juga berperan dalam mengontrol emisi. Dengan menggunakan jumlah udara yang tepat, udara sekunder dapat mengurangi emisi yang dihasilkan selama proses pembakaran (Houshfar dkk., 2011).

Salah satu efek dari udara sekunder adalah menurunkan kecepatan fluidisasi dalam fase padat. Hal ini mengakibatkan partikel bahan bakar memiliki waktu tinggal yang lebih lama di dalam ruang bakar, memungkinkan pembakaran yang lebih efisien dan sempurna. Selain itu, aliran turbulen yang dihasilkan oleh udara sekunder dalam fase fluida juga berkontribusi dalam meningkatkan perpindahan massa antara gas dan partikel padat. Dengan adanya turbulensi ini, partikel bahan bakar memiliki lebih banyak kontak dengan udara, sehingga proses pembakaran menjadi lebih optimal (Xue dkk., 2020).

Secara keseluruhan, penggunaan udara sekunder dalam pembakaran memiliki efek positif dalam meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi yang dihasilkan.

Dari studi eksperimental yang dilakukan (Houshfar dkk., 2011). Pengaruh pembakaran biomassa dua tahap signifikan untuk pengurangan tingkat emisi NO_x . Pembakaran udara bertahap dalam hal ini dapat menurunkan tingkat emisi NO_x hingga 50-75% bahkan hingga 85% pada kondisi optimal. Pengurangan NO_x maksimum terjadi ketika udara primer diinjeksikan pada rasio udara berlebih primer sebesar 0,8-0,95% dan rasio udara berlebih total sebesar 1,6-1,9% untuk udara bertahap.

2.8 Efisiensi Pembakaran

Pembakaran yang tentunya memerlukan hasil seberapa optimal proses pembakaran yang terjadi. 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 2.7 berdasarkan kadar CO dan CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran.

$$\eta = \frac{c_{CO_2}}{C_{CO} + c_{CO_2}} 100\% \dots \dots \dots (2.7)$$

2.9 Emisi

Emisi dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan salah satu konsentrasi permasalahan dalam penggunaan bahan bakar fosil dimana emisi yang dihasilkan selama proses pembakaran dapat membahayakan kesehatan publik. Produk utama pembakaran karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) dapat menimbulkan efek rumah kaca dan pembentukan kabut lokal. Adapun produk sekunder proses pembakaran adalah karbon monoksida (CO), hidrokarbon yang tidak terbakar (HC), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂) dan jelaga. Apabila produk emisi ini terus dibiarkan dan tidak terkontrol dalam udara maka dapat menyebabkan masalah bagi kesehatan dan lingkungan hidup dalam bentuk pencemaran. Sementara itu dua parameter utama yang mempengaruhi formasi polutan dalam pembakaran adalah temperatur dan

waktu tinggal. Temperatur merupakan parameter terpenting di dalam proses pembakaran karena laju reaksi eksponensial bergantung pada temperatur. Sebagai contoh formasi NO dalam proses pembakaran sangat tergantung pada temperatur yang digunakan.

Temperatur berdampak pada serangkaian reaksi kimia tertentu dan berlangsung secara konsekuen. Dalam rangka terjadinya reaksi kimia yang sempurna maka diperlukan waktu tertentu, reaktan harus tinggal di dalam ruang bakar lebih lama dari waktu yang diperlukannya untuk bereaksi. Total waktu yang diperlukan reaktan tinggal di dalam ruang bakar ini disebut dengan waktu tinggal (McAllister dkk., 2011).

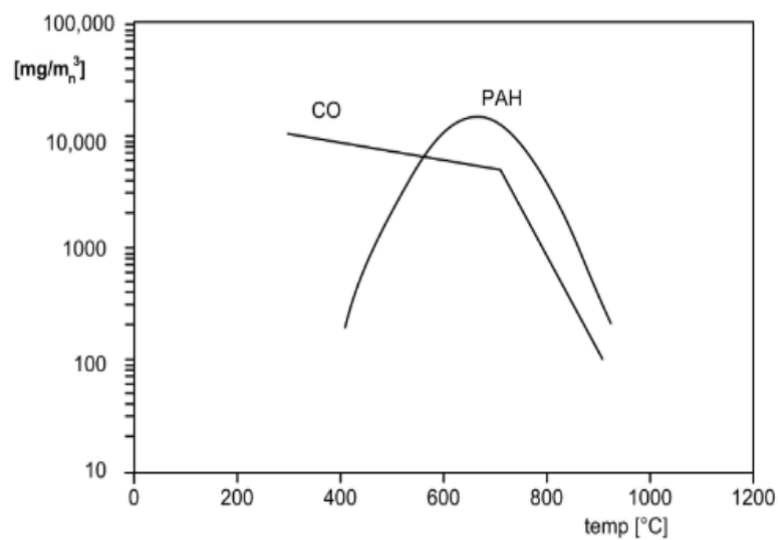
2.9.1 Emisi Karbon Monoksida (CO)

Konversi karbon dalam bahan bakar menjadi CO_2 tergantung pada beberapa langkah standar dan dapat terjadi dengan langkang reaksi yang berbeda-beda. CO akan teroksidasi menjadi CO_2 apabila terdapat oksigen cukup.

CO dapat menjadi sebuah indikator apakah proses pembakaran berlangsung secara sempurna atau tidak. Kondisi rasio udara berlebih (excess air) yang tinggi akan mengakibatkan penurunan temperatur dimana rasio udara berlebih yang rendah akan mengakibatkan kondisi campuran yang tidak memadai, oleh karena itu diperlukan rasio udara

berlebih yang spesifik untuk menghasilkan emisi CO yang rendah(Loo, 2008).

Temperatur memainkan peranan yang penting untuk mengatur tingkatan emisi CO yang dihasilkan. Oleh karena itu pemilihan temperatur pembakaran yang sesuai dapat menjadi salah satu cara untuk mengurangi tingkat emisi CO yang dihasilkan dari suatu sistem pembakaran. Pengaruh temperatur terhadap pembentukan emisi CO ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Pengaruh temperatur pembakaran terhadap emisi co (Loo, 2008).

2.9.2 Emisi Nitrogen Oksida (NO_x)

Emisi NO_x dari pembakaran biomassa secara garis besar merupakan akibat dari proses oksidasi dari kandungan nitogen dalam biomassa itu sendiri (*fuel nitrogen*), hal ini terlihat kontras dengan pembakaran

bahan bakar fosil dimana kandungan nitrogen di udara juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi NO_x . Emisi NO_x dapat terjadi pada pembakaran dengan fasa gas atau pembakaran arang.

Nitrat oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO_2) menjadi penyusun utama dari polutan ini. NO_x yang paling banyak jumlahnya, terbentuk pada pembakaran bertemperatur tinggi hingga dapat mereaksikan nitrogen yang terkandung pada bahan bakar dan/atau udara, dengan oksigen. Jumlah dari NO_x yang terbentuk tergantung atas jumlah dari nitrogen dan oksigen yang tersedia, temperatur pembakaran yang tinggi mendekati 1300°C , maka jumlah total NO_x yang terbentuk akan terus meningkat seiring dengan naiknya temperatur, intensitas pencampuran, serta waktu reaksinya.

Bahaya polutan NO_x yang paling besar berasal dari NO_2 , yang terbentuk dari reaksi NO dengan oksigen. Gas NO_2 dapat menyerap spektrum cahaya sehingga dapat mengurangi jarak pandang manusia. Selain itu NO_x dapat mengakibatkan hujan asam, gangguan pernapasan manusia, korosi pada material, dan kerusakan tumbuhan.

2.9.3 Emisi Sulfur Dioksida (SO_2)

Secara umum persentase SO_2 yang terbentuk selama proses pembakaran sekitar 95% dan SO_3 sebesar 5%. Dalam jumlah yang signifikan kandungan sulfur dalam bahan bakar terkonversi pada abu dalam bentuk garam (K_2SO_4) atau dalam bentuk H_2S . Kandungan emisi

SO₂ di dalam pembakaran biomassa bergantung pada kandungan sulfur dalam biomassa itu sendiri atau temperatur pembakarannya. Temperatur pembakaran yang meningkat akan mengakibatkan proses pembakaran biomassa melepaskan kandungan sulfur baik dalam bentuk organik ataupun anorganik sehingga akan mengakibatkan kandungan SO₂ meningkat (Zhao,2016).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu yang dilakukan selama proses penelitian adalah sebagai berikut :

3.1.1 Tempat Penelitian

Proses penelitian yang dilakukan di beberapa tempat yaitu :

1. Proses penyiapan sampel yaitu pelepah kelapa sawit tertorefaksi yang dilakukan di hangar Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
2. Proses pengujian dan pengambilan data dilakukan di hangar Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dan Laboratorium analisis dan instrumentasi Jurusan Teknik Kimia Universitas Lampung.
3. Proses pembuatan alat dilakukan di Bengkel professional CV. ALSINTAN (Alat Mesin dan Pertanian) MUARA Jalan Jendral Sudirman No.78 Metro Barat, Kota Metro Prov. Lampung.
4. Pengujian hasil emisi dilakukan di Laboratorium Baristand Industri Bandar Lampung (Jl. Soekarno Hatta KM.1, Rajabasa, Rajabasa Raya, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung).

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan april 2023 sampai dengan bulan juni 2023

3.2 Alat dan Bahan

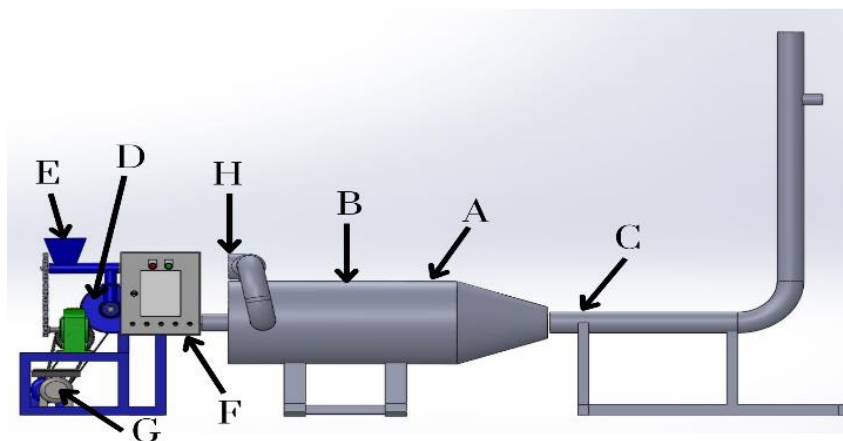
Alat dan bahan yang digunakan selama proses penelitian adalah sebagai berikut :

3.2.1 Alat Utama Penelitian

Berikut merupakan alat utama yang digunakan selama proses penelitian:

1. *Pulverized burner*

Alat *pulverized burner* merupakan mesin *coal-combustion* skala lab yang digunakan untuk membakar sampel uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 skema alat uji berikut.



Gambar 3. 1 Skema alat *coal- cumbustion pulverized burner*

Keterangan gambar:

A. Termokopel a

Termokopel a dengan tipe K berfungsi mengukur temperatur burner saat terjadi pembakaran yang kemudian dihubungkan ke *temperature recorder*.

B. *Burner*

Burner berfungsi sebagai ruang bakar pada proses pembakaran. Material *burner* terbuat dari material baja karbon tinggi yang dilapisi dengan tanah liat agar tahan terhadap temperatur yang tinggi.

C. Termokopel b

Termokopel b dengan tipe K berfungsi mengukur temperatur nyala api yang kemudian dihubungkan ke *temperature recorder*.

D. *Blower*

Blower berfungsi sebagai pemasok udara dan bahan bakar ke ruang bakar atau *burner*.

E. *Hopper*

Hopper berfungsi sebagai tempat memasukkan batu bara serbuk sebagai bahan bakar.

F. Panel instrumen

Panel instrumen berfungsi sebagai tempat pengatur motor listrik dan *blower*, serta menampilkan temperatur yang terukur.

G. Motor listrik

Motor listrik berfungsi sebagai alat penggerak *blower*.

H. Lubang Udara Sekunder

Lubang udara sekunder berfungsi sebagai tempat masuknya udara sekunder pembakaran. Selain itu juga digunakan untuk memasukan pemantik api gas LPG yang berfungsi sebagai pemanasan awal *burner*.

3.2.2 Alat Pendukung Penelitian

1. *Gas analyzer* E 6000-5DS

Gas analyzer E 6000-5DS digunakan untuk mengukur kadar emisi yang dihasilkan pada proses pembakaran dan dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2 *Gas analyzer* E 6000- 5DS

2. Timbangan Digital

Timbangan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan timbangan digital berkapasitas maksimal 7 kg dan ketelitian 1 gram. Timbangan yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3



Gambar 3. 3 Timbangan Digital B2090

3. Perekam Temperatur

Perekam temperatur yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Temperature Recorder* dengan merk Lutron type BTM- 4208SD dengan temperatur operasional -100 sampai 1.300°C. *Temperature Recorder* BTM-4208SD memiliki 12 *channels* temperatur yang dihubungkan ke termokopel type K pada *pulverized burner*. Digunakan untuk melihat dan merekam kenaikan temperatur yang terjadi di ruang pembakaran *pulverized burner* dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Perekam temperatur BTM-4208SD

4. Ayakan 100 *mesh*

Ayakan yang digunakan untuk menyaring batu bara dan pelepah sawit supaya memiliki ukuran yang seragam 100 *mesh*. Ayakan 100 *mesh* dapat dilihat pada gambar 3.5 sebagai berikut



Gambar 3. 5 Ayakan 100 *mesh*.

3.2.3 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai sampel uji adalah tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi dan batu bara *sub bituminous* B. Adapun spesifikasi bahan yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Spesifikasi bahan

Hasil Analisis	Unsur Penyusun	Bahan		
		BatuBara Sub-bituminus B	Pelepah sawit Tertorefaksi	Pelepah sawit Mentah
Analisis Ultimat (%)	N	0,91	0,50	0,72
	C	60,74	61,54	57,39
	H	6,17	1,47	7,647
	O	27,33	32,56	34,25
	S	0,52	-	-
	MC	15	7,88	13,59
Analisis Proksimat (%)	VM	40,64	70,79	73,08
	FC	39,41	16,06	10,22
	ASH	4,34	5,10	3,11
Nilai Kalor Bahan Bakar (cal/g)		5820	6191	4731

3.3 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.3.1 Prosedur Persiapan Sampel Uji

Persiapan sampel uji dilakukan di hanggar Teknik Mesin Universitas Lampung. Pada penelitian ini sampel uji pelepah kelapa sawit ditorefaksi dan dilakukan penggilingan lalu diayak digunakan ayakan *mesh* berukuran *Mesh* 100. Prosedur persiapan sampel uji yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan torefaksi terhadap pelepah kelapa sawit pada temperatur 275°C 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. Mengayak pelepah sawit mentah yang telah digiling dengan *hammer mill* dengan ayakan *mesh* 100.
5. Melakukan pemisahan sampel pengujian dengan variasi pengujian *excess air* 0%, 10%

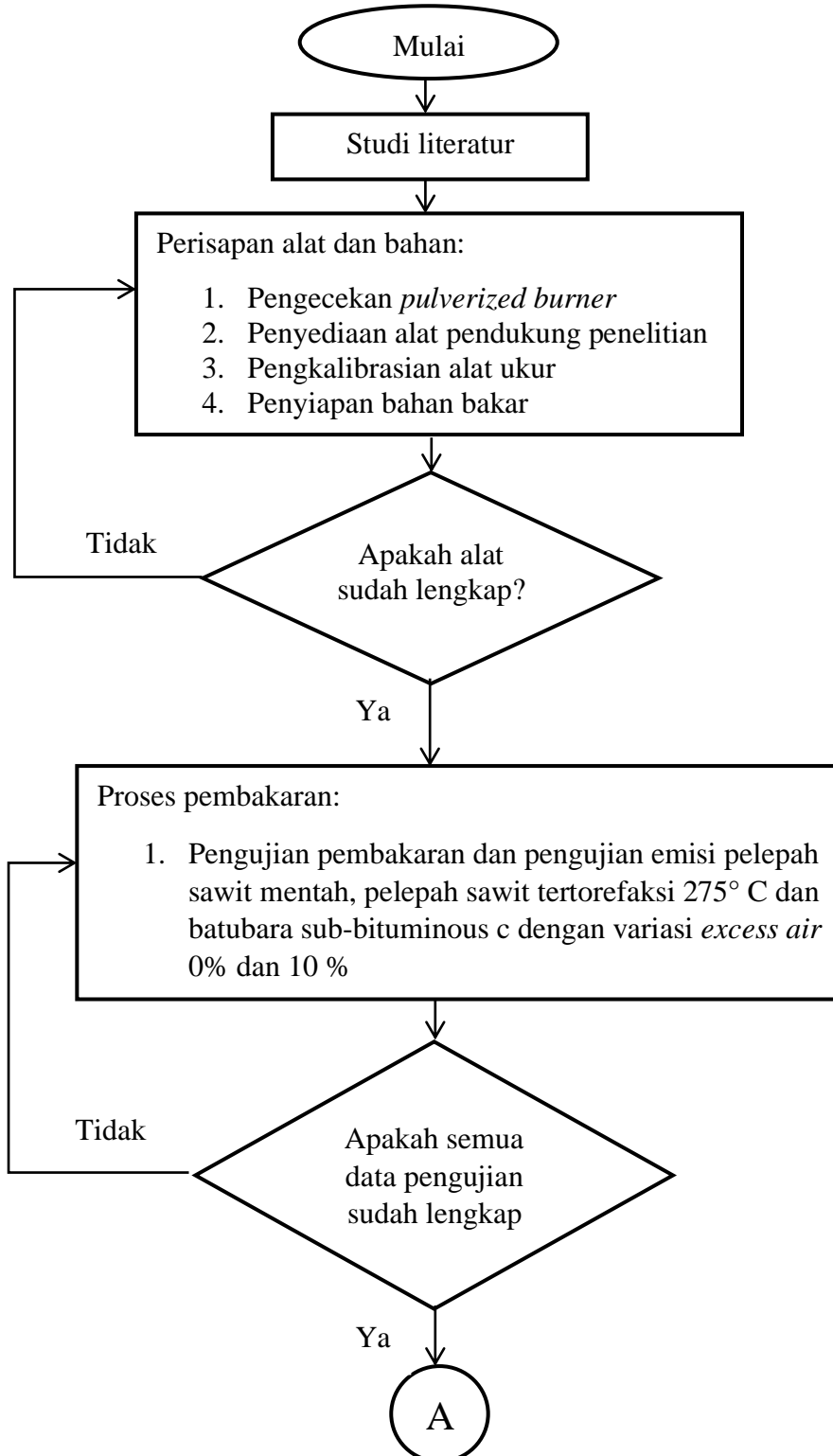
3.3.2 Prosedur Pengujian

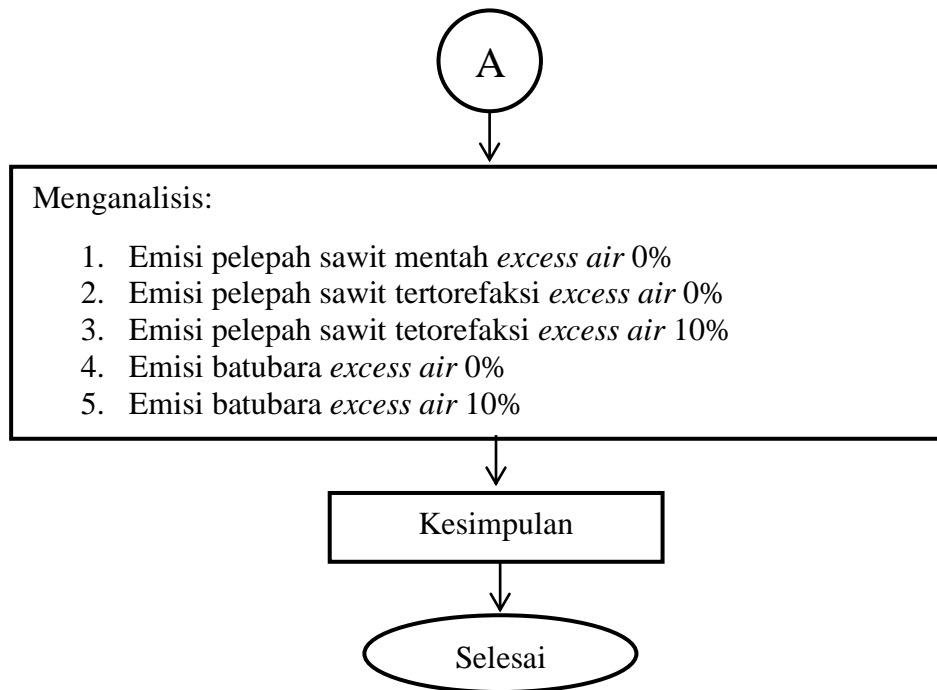
Prosedur pengujian dilakukan di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Proses pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat pengujian seperti mesin *coal-combustion pulverized burner* dan *temperature recorder*
2. Menghubungkan *temperature recorder* dengan termokopel yang ada pada *pulverized burner*, lalu menghidupkannya.
3. Melakukan pemanasan burner dengan batu bara bongkahan hingga mencapai temperatur 700°C.
4. Memasukan bahan bakar serbuk kedalam *hopper*.
5. Menyalakan *blower* primer dan sekunder mengatur pada kecepatan angin disesuaikan dengan kebutuhan udara teoritis menggunakan *inverter* pada panel instrumen
6. Menunggu dan memperhatikan pembakaran hingga stabil
7. Setelah stabil dilakukan pengukuran emisi menggunakan *gas analyzer* dengan memasukan alat pada bagian *exhaust* dari alat *pulverized burner*.
8. Jika bahan bakar serbuk batu bara sudah terbakar habis, menekan sekali tombol *logger* dan kemudian menekan tahan tombol *rec* pada *temperature recorder*.
9. Mengulangi prosedur (4) sampai (8) menggunakan sampel uji pada variasi *excess air* yang berbeda.
10. Mengolah seluruh data yang terkumpul.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian pengaruh variasi ukuran partikel batu bara sub bituminus terhadap profil temperatur pembakaran ditunjukkan pada Gambar 3.6.





Gambar 3. 6 Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian pengujian karakteristik emisi pembakaran batubara, pelepah sawit mentah, dan pelepah sawit tertorefaksi variasi *excess air* adalah sebagai berikut:

1. Dari hasil pengujian, karakteristik emisi terbaik diperoleh pada bahan pelepah sawit tertorefaksi variasi *excess air* 10% dengan nilai CO, CO₂, SO₂, dan NO_x berturut-turut sebesar sebesar 4647 ppm, 34000 ppm, 35 ppm, 267 ppm serta efisiensi sebesar 91%.
2. Penambahan *excess air* menyebabkan emisi yang dihasilkan lebih baik, ditandai penurunan emisi CO sebesar 22,5 %, penurunan emisi SO₂ sebesar 3,42%, dan penurunan emisi NO_x 2,68 % pada batubara. Pada sampel pelepah penurunan emisi CO sebesar 20,2 %, penurunan emisi SO₂ 3,42%, dan emisi NO_x mengalami penurunan sebesar 13,4 %.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan pengujian yang telah dilakukan untuk pengembangan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Melanjutkan penelitian tentang *co-firing* antara batubara dengan pelepah sawit tertorefaksi dengan variasi *excess air* yang lebih banyak.
2. Perlu dilakukan pengkondisian temperatur ruang kerja pada saat pengujian.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang variasi komposisi yang tepat untuk *co-firing* antara batubara dengan pelepah sawit tertorefaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, N., Saleem, M., Shahzad, K., Chughtai, A., & Khan, W. A. (2014). Fast pyrolysis of Pakistani cotton stalks in fluidized bed reactor: design and preliminary results. *Life Science Journal*, 11(7).
- Atnaw, S. M., Sulaiman, S. A., & Yusup, S. (2011). Downdraft gasification of oil-palm fronds. *Trends in Applied Sciences Research*, 6(9), 1006.
- Badan Pusat Statistik. (2012). Statistik kelapa sawit indonesia 2021. www.bps.go.id
- Basu, P. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. United Kingdom: Dalhousie University and Greenfield Research Incorporated.
- de Souza-Santos, M.L. (2010). Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation, and Equipment Operations Second Edition (2nd ed.). CRC Press <https://doi.org/10.1201/9781420047509>.
- Gelashvili, G., Gelenidze, D., Nanobashvili, S., Nanobashvili, I., Tavkheldidze, G., & Sitchinava, T. (2018). Plasma Arc Burner for Pulverized Coal Combustion. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 12(6), 283-286.
- Gómez, M., Martín, R., Collazo, J., & Porteiro, J. (2018). CFD Steady Model Applied to a Biomass Boiler Operating in Air Enrichment Conditions. *Energies*, 11(10), 2513. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/en11102513>.

- 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.
- Hutomo, D. F. (2015). Analisa kebutuhan udara untuk pembakaran sempurna pada boiler unit 1 pltu 3 jawa timur tanjung awar – awar. Semarang. Universitas Diponegoro.
- Houshfar, E., Skreiberg., Løvås, T., Todorović, D., & Sørum, L. (2011). Effect of excess air ratio and temperature on NO_x emission from grate combustion of biomass in the staged air combustion scenario. *Energy & Fuels*, 25(10), 4643-4654.
- Mahandri, C. P. (2010). Fenomena flame lift-up pada pembakaran premixed gas propana. *Jakarta: Universitas Indonesia*.
- McAllister, S., Chen, Y.J., Pello, F.C.A. 2011. *Fundamentals of Combustion Processes*. Springer. New York. Pp 299.
- Muanif. 2013. Evaluasi Bilangan Excess Air Unit 2PLTU 1 Jawa Timur Pacitan. Laporan Tugas Akhir. Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Hal 4
- Nawawi, D. S., Carolina, A., Saskia, T., Darmawan, D., & Gusvina, S. L. (2018). Karakteristik Kimia Biomassa untuk Energi (Chemical Characteristics of Biomass for Energy). *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 16(1), 44-51.
- Nordgren, Daniel. *Experimental Studies of Pulverised Biomass Combustion*. Luleå University of Technology. (Thesis). Luleå. 2011
- Pengmei Lv, Chang, J., Wang, T., dan Wu, C. A Kinetic Study on Biomass Fast Catalytic Pyrolysis. *Energy & Fuels* 2004, vol 18 hal. 1865-1869
- PT PLN. (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030. Keputusan Menteri ESDM No 188.K/HK.02/MEM.L/2021. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030, 2019– 2028.

Rizqi, H.D., Guntur, H.L., Putra, A.B.K., Kusumadewi, T.V., Nasution, A.H., Sinansari, P., Kurniawan, F., (2023), Kajian Potensi Bambu untuk Mendukung Penerapan Co-firing pada Pembangkit Listrik Jawa Bali, *Sewagati*, 7(1):85–90, <https://doi.org/10.12962/j26139960.v7i1.277>

Susilowati, S., Helwani, Z., & Komalasari, K. (2017). Bahan Bakar Padat Dari Pelelah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi; Variasi Suhu Dan Ukuran Bahan Baku. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains*, 4(1), 1-4.

Simanihuruk, K., Junjungan, & Tarigan, A. 2008. Pemanfaatan Pelelah Kelapa Sawit Sebagai Pakan Basal Kambing Kacang Fase Pertumbuhan. Seminar Nasional Teknologi Peternakan dan Veteriner.

Sjaak van Loo, J. K. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*.

Susila, h., az purwono budi, santoso., rina, s., & heru tri, sutiono. (2017). *Buku ajar: biomassa sebagai sumber energi masa depan*.

World Coal Institute. (2009). *The Coal Resource A Comprehensive Overview Of Coal*: World Coal Institute.

Zhao, B., Su, Y., Liu, D., Zhang, H., Liu, W., and Cui, G. 2016. SO₂/NO_x Emission and Ash Formation from Algae Biomass Combustion: Process Characteristic and Mechanism. *Journal energy*.