

**KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN TANDAN KOSONG  
KELAPA SAWIT DENGAN *CO-FIRING* BATU BARA  
VARIASI *AIR FUEL RATIO* (AFR)**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ANDREAS NOVENDRA DWIYANTO MARBUN  
NPM 1915021042**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

**KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN TANDAN KOSONG  
KELAPA SAWIT DENGAN CO-FIRING BATU BARA  
VARIASI AIR FUEL RATIO (AFR)**

**Oleh**

**ANDREAS NOVENDRA DWIYANTO MARBUN  
NPM 1915021042**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik  
Universitas**



**PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DENGAN CO-FIRING BATU BARA VARIASI AIR FUEL RATIO (AFR)

Oleh

**Andreas Novendra Dwiyanto Marbun**

Permintaan listrik yang terus meningkat mengakibatkan kenaikan permintaan batu bara. Permintaan batu bara terus meningkat karena pembangkitan daya masih bergantung pada batu bara. Selain itu efek gas rumah kaca paling tinggi diakibatkan dari pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Disisi lain biomassa dapat menjadi pengganti atau pendamping batu bara sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Salah satu biomassa yang berpotensi adalah limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Sebagai pendamping batu bara (*co-firing*), TKKS dapat mengurangi laju emisi gas rumah kaca dan penggunaan batu bara pada pembangkit listrik. Penelitian *co-firing* batu bara dan TKKS pada *pulverized burner* dilakukan untuk mengetahui dampak *co-firing* terhadap emisi pembakaran. Penelitian ini diawali dengan menyiapkan TKKS tertorefaksi dan batu bara dalam bentuk serbuk ukuran *mesh* 100. Perbandingan batu bara dan TKKS yang diamati adalah 80:20. Selanjutnya dilakukan pengujian pengaruh *air fuel ratio* (AFR) terhadap emisi *co-firing* yang dihasilkan. Emisi pembakaran diukur menggunakan *gas analyzer*. Hasil penelitian menunjukkan *co-firing* TKKS 20% dapat menurunkan kadar emisi CO 22,58% (1490 ppm), SO<sub>2</sub> 14,96% (70 ppm) dan NO<sub>2</sub> 10,49% (43 ppm). Analisis data yang dilakukan menunjukkan bahwa penambahan AFR mempengaruhi emisi pembakaran. Pada *co-firing* dengan AFR 30% emisi CO yang dihasilkan 4003 ppm, SO<sub>2</sub> 298 ppm, dan NO<sub>2</sub> 334 ppm. Hasil ini lebih baik dibandingkan dengan variasi tanpa *excess air*, *excess air* 10, dan 20%. *Co-firing* TKKS 20% dengan AFR 30% berhasil menurunkan emisi yang signifikan sekaligus menaikkan efisiensi pembakaran.

Kata Kunci : Biomassa, Pembakaran, Emisi, *Co-firing* , Biomassa

## **ABSTRACT**

### **EMISSION CHARACTERISTICS OF OIL PALM EMPTY COMBUSTION WITH CO-FIRING VARIATION OF AIR FUEL RATIO (AFR)**

By

**Andreas Novendra Dwiyanto Marbun**

*The increasing electricity demand has led to a rise in coal demand. The demand for coal keeps increasing because power generation still relies on coal. Furthermore, the highest greenhouse gas effects are caused by coal-fired power generation. On the other hand, biomass can serve as a substitute or companion to coal as a fuel for power generation. One potential biomass is empty palm oil fruit bunch (EFB) waste. As a coal companion (co-firing), EFB can reduce the rate of greenhouse gas emissions and the use of coal in power generation. Research on coal and EFB co-firing in a pulverized burner was conducted to determine the impact of co-firing on combustion emissions. The study began by preparing torrefied EFB and coal in powder form with a mesh size of 100. The observed coal-to-EFB ratio was 80:20. Subsequently, tests were performed to examine the influence of the air-fuel ratio (AFR) on the emissions produced by co-firing. Combustion emissions were measured using a gas analyzer. The research results indicate that a 20% EFB co-firing can reduce CO emissions by 22.58% (1490 ppm), SO<sub>2</sub> by 14.96% (70 ppm), and NO<sub>2</sub> by 10.49% (43 ppm). Data analysis shows that the addition of AFR affects combustion emissions. In co-firing with a 30% AFR, the resulting CO emissions were 4003 ppm, SO<sub>2</sub> was 298 ppm, and NO<sub>2</sub> was 334 ppm. These results are better compared to variations without excess air, with 10% excess air, and with 20% excess air. Co-firing 20% EFB with a 30% AFR successfully reduced emissions significantly while increasing combustion efficiency.*

*Keywords: Biomass, Combustion, Emissions, Co-firing, Biomass*

Judul Skripsi : KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN  
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT  
DENGAN *COFIRING* BATUBARA  
: MENGGUNAKAN VARIASI *AIR FUEL*  
*RATIO* (AFR)

Nama Mahasiswa : Andreas Novendra Dwiyanto Marbun

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021042

Program Studi : Strata I (S1)

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing



Dr. Amrul, S.T., M.T.  
NIP. 19710331 199903 1 003



Hadi Pravitno, S.T., M.T.  
NIP. 19880514 201903 1 012

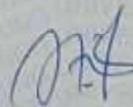
MENGETAHUI

Ketua Jurusan  
Teknik Mesin



Dr. Amrul, S.T., M.T.  
NIP. 19710331 199903 1 003

Ketua Program Studi  
S1 Teknik Mesin



Novri Tanti, S.T., M.T.  
NIP. 19701104 199703 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

Penguji Utama : Ir. Herry Wardono, M.Sc., IPM., ASEAN Eng

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ing. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. |  
NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 02 Agustus 2023

**LEMBAR PERNYATAAN**

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN  
BUKAN HASIL PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM  
PASAL 36 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG  
DENGAN PERATURAN REKTOR No. 13 TAHUN 2019

Bandar Lampung, 16 Agustus 2023

Pembuat Pernyataan



**Andreas Novendra Dwivanto Marbun**

NPM 1915021042

## **MOTO**

“Belajar dan berkembang untuk memenangkan kompetisi”

Andreas Novendra Dwiyanto Marbun

*“If you're not a good shot today, don't worry. There are other ways to be useful”*

(Alexander Sasha Novikov)

*“Be kind and compassionate to one another, forgiving each other, just as in Christ God forgave you.”*

*(Ephesians 4:32)*

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan Tuhan Yang Maha Esa karena berkat anugerah dan berkat-Nya penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Skripsi ini penulis buat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan dalam ilmu di bidang energi khususnya energi terbarukan biomassa. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku pembimbing I dan Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
3. Ibu Novri Tanti, S.T., M.T., selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Herry Wardono, M.Sc., IPM., ASEAN Eng. selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi dan meluruskan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.
7. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.

8. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
9. Kepada bapak Manahat Marbun dan Ibu Friwaty Simbolon selaku Orang Tua tersayang yang selalu menyemangati, mendukung dalam segi apapun, memotivasi dan mendoakan penulis setiap waktu.
10. Kepada Leonardo “KzekAi” Cleverson Marbun dan Giovanny Kimberly Laura Marbun selaku abang dan adik yang selalu memberikan motivasi, pembelajaran, dan semangat untuk penulis, dan selalu menyokong kebutuhan penulis selama masa kuliah.
11. Kepada teman seperjuangan Andrian Hasbi Pratama yang telah memberikan bantuan dan dorongan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan masa perkuliahan dengan baik sejak dimulainya masa perkuliahan.
12. Teman kontrakan Akmal, Daffa, Dayu, Ihsan, Samuel, Takwa dan Tito yang selalu membantu dan memberikan support kepada saya selama masa perkuliahan dari awal hingga sekarang.
13. Paduan suara mahasiswa Universitas Lampung dan COVID-19 yang membantu dan memberikan semangat serta arahan dalam menjalankan perkuliahan.
14. Seluruh tim torefaksi yang selalu menemani dan memberikan bantuan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi.
15. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin Unila Angkatan 2019 yang telah memberikan bantuan dan dukungannya kepada penulis.
16. Kepada seorang yang bernomorkan 2054051011 dalam perkuliahan di Universitas Lampung karena telah membantu dan memberikan semangat dalam menyelesaikan perkuliahan dengan baik.

Penulis sangat bersyukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena telah diberkati serta dapat dipertemukan oleh orang-orang baik yang membantu penulis dalam proses perkuliahan untuk menyelesaikan skripsi dan semoga Tuhan dapat membalas kebaikannya serta selalu diberkati dan dilindungi oleh-Nya. Penulis juga menyadari masih

banyak kekurangan dan masih jauh dari kesempurnaan dalam penulisan skripsi ini, dan sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya dan dapat menjadi ilmu yang berguna. Amin.

Bandar lampung, Agustus 2023

**Andreas Novendra D. M**

**NPM. 1915021042**

## RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Cihampelas, kota Bandung provinsi Jawa barat pada tanggal 3 November 2000, penulis merupakan anak ke dua dari tiga bersaudara, dari pasangan bapak Manahat Marbun dan ibu Friwaty Simbolon. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD MUTIARA BANGSA 1 hingga tahun 2013, lalu melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP MUTIARA BANGSA 1 yang diselesaikan pada tahun 2016, kemudian melanjutkan ke pendidikan tingkat atas di SMA NEGERI 2 KOTA TANGERANG yang diselesaikan pada tahun 2019, hingga pada tahun 2019 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif menjadi anggota di beberapa organisasi kampus antara lain, Staff divisi dana dan usaha Paduan Suara Mahasiswa Universitas Lampung 2020, Kepala divisi dana dan usaha Paduan Suara Mahasiswa Universitas Lampung 2021, dan Kepala divisi Penelitian dan Pengembangan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) 2021.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PT. Perkebunan Nusantara VII (Persero). Lampung Tengah pada tahun 2022 dengan judul laporan “**ANALISIS ENERGI TERMAL STERILIZER PADA PROSES PEREBUSAN KELAPA SAWIT DI PT. PERKEBUNAN NUSANTARA 7 UNIT BEKRI**”.

Tahun 2022 penulis tergabung dalam tim penelitian torefaksi dengan judul penelitian ” **KARAKTERISTIK EMISI PEMBAKARAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DENGAN CO-FIRING BATU BARA VARIASI AIR FUEL RATIO (AFR)**”. Di bawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T.

## Daftar Isi

SANWACANA.....	viii
<b>Daftar Isi</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Daftar Tabel</b> .....	<b>xvi</b>
<b>Daftar Gambar</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Daftar Notasi</b> .....	<b>xviii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1. 1. Latar Belakang .....	1
1. 2. Tujuan Penelitian .....	5
1. 3. Manfaat Penelitian .....	5
1. 4. Batasan Masalah .....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1 Biomassa.....	6
2.1.1 Pemilihan jenis biomassa.....	6
2.1.2 Potensi biomassa perkebunan kelapa sawit.....	9
2.1.3 Upgrading biomassa .....	12
2.1.4 Pemanfaatan biomassa.....	14
2.1.5 Proses pembakaran biomassa .....	15
2.1.6 Konsentrasi dan relevansi C, H, O dan volatile.....	16
2.2 Batu bara .....	17
2. 2. 1 Lignit .....	19
2. 2. 2 Sub bituminous .....	19
2. 2. 3 Bituminous .....	21
2. 2. 4 Antrasit .....	21
2.3 <i>Co-combustion</i> .....	23
2.4 Pembakaran .....	26
2. 4. 1 Waktu Pembakaran.....	<b>28</b>
2. 4. 2 Temperatur Pembakaran.....	<b>28</b>

2. 4. 3	Turbulensi.....	28
2.5	Mekanisme Pembakaran .....	29
2. 5. 1	Pemanasan dan Pengeringan .....	29
2. 5. 2	Pirolisis .....	29
2. 5. 3	Oksidasi Volatil .....	30
2. 5. 4	Oksidasi Arang .....	30
2. 5. 5	Pembentukan Emisi .....	30
2. 5. 6	Reaksi Bahan Anorganik.....	30
2. 5. 7	Pembakaran dan Pelepasan Panas .....	31
2.6	Efisiensi pembakaran .....	31
2.7	Udara pembakaran.....	31
2. 7. 1	Udara primer.....	32
2. 7. 2	Udara sekunder .....	32
2. 7. 3	Udara tersier .....	32
2.8	<i>Air Fuel Ratio</i> (AFR) .....	33
2.9	Pembakaran Stoikiometri.....	35
2.10	Pembakaran Non Stoikiometri.....	36
2.11	Udara Berlebih ( <i>Excess Air</i> ).....	37
2.12	Pengaruh Udara Berlebih Pada Emisi .....	37
2.13	Emisi.....	38
2. 8. 1	Emisi CO .....	39
2. 8. 2	Emisi NO <sub>2</sub> .....	39
2. 8. 3	Emisi SO <sub>2</sub> .....	40
2. 8. 4	Emisi CO <sub>2</sub> .....	40
<b>III.</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>41</b>
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian .....	41
3.1.1	Tempat penelitian .....	41
3.1.2	Waktu Penelitian .....	42
3.2	Alat dan Bahan.....	42
3.2.1	Alat .....	42
3.2.2	Bahan .....	46
3.3	Metode Pengambilan Data.....	47

3.4.1	Prosedur Persiapan Sampel Uji .....	47
3.4.2	Pengujian <i>Co-firing</i> .....	47
3.4.3	Prosedur Pengujian .....	49
3.4	Diagram Alir Penelitian .....	50
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>50</b>
4.1	Data.....	50
4.2	Pembakaran <i>Cofiring</i> batu bara dan TKKS Tertorefaksi.....	51
4.3	Pengaruh <i>Excess air</i> terhadap CO dan CO <sub>2</sub> .....	52
4.4	Pengaruh <i>excess air</i> terhadap SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> .....	57
<b>V.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>61</b>
5.1.	Kesimpulan.....	61
5.2.	Saran.....	62
	<b>Daftar Pustaka.....</b>	<b>63</b>

## Daftar Tabel

Tabel 2. 1 Konsentrasi C, H, O dan volatil bahan bakar biomassa.....	17
Tabel 2. 2 Karakteristik batu bara <i>sub bituminous</i> .....	20
Tabel 2. 3 Analisis ultimat batu bara <i>sub bituminous</i> .....	20
Tabel 2. 4 Persentase karakteristik batu bara dan Kayu.....	22
Tabel 3. 1 Spesifikasi bahan .....	46
Tabel 4. 1 Data hasil Pengujian.....	50
Tabel 4. 2 Data Perubahan Karakteristik .....	60

## Daftar Gambar

Gambar 2. 1 Potensi Biomassa Kelapa Sawit .....	10
Gambar 2. 2 Analisis proksimat dan ultimat TKKS .....	11
Gambar 2. 3 Komposisi kimia dari berbagai bahan bakar padat . .....	12
Gambar 2. 4 Pembakaran biomassa dalam tahap berbeda. ....	16
Gambar 2. 5 <i>Fixed bed combustion</i> .....	25
Gambar 2. 6 <i>Fluidized bed combustion</i> .....	25
Gambar 2. 7 <i>Pulverized fuel combustion</i> .....	26
Gambar 3. 1 <i>Gas Analyzer</i> .....	42
Gambar 3. 2 Timbangan.....	43
Gambar 3. 3 Skema alat <i>coal-combustion pulverized burner</i> .....	43
Gambar 3. 4 <i>Temperature recorder</i> BTM-4208SD .....	45
Gambar 3. 5 Skema pengujian. ....	49
Gambar 3. 6 <i>Flowchart</i> alur penelitian .....	50
Gambar 4. 1 Konsentrasi CO dan CO <sub>2</sub> variasi AFR.....	52
Gambar 4. 2 Efisiensi Pembakaran variasi AFR.....	56
Gambar 4. 3 Konsentrasi SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> variasi AFR.....	57

### Daftar Notasi

$\eta$	: Efisiensi pembakaran (%)
$\Phi$	: Rasio ekivalen
$AFR$	: <i>Air fuel ratio</i>
$AFR a$	: <i>Air fuel ratio</i> aktual
$AFR s$	: <i>Air fuel ratio</i> stoikiometri
$C_{CO}$	: Konsentrasi gas karbon monoksida (%)
$C_{CO_2}$	: Konsentrasi gas karbon dioksida, (%)
$FAR$	: <i>Fuel air ratio</i>
$FAR a$	: <i>Fuel air ratio</i> aktual
$FAR s$	: <i>Fuel air ratio</i> stoikiometri
$m$	: Massa (kg)
$ma$	: Massa udara (kg)
$mf$	: Massa bahan bakar (kg)
$\%XSA$	: Persentase udara berlebih (%)
$XO_2$	: Kadar oksigen (kg)
$XN_2$	: Kadar nitrogen (kg)
$Mf$	: Massa molar bahan bakar (kg/kmol)
$\dot{N}f$	: Bilangan mol bahan bakar (kmol)
$Ma$	: Massa molar udara (kg/kmol)
$\dot{N}$	: Bilangan mol (kmol)
$mO_2$	: massa oksigen, kg
$C_xH_y$	: Bahan bakar hidrokarbon

# I. PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Konsumsi energi pada kehidupan manusia semakin meningkat setiap tahunnya sehingga dapat mengakibatkan berkurangnya pasokan energi yang ada. Bahan bakar fosil pada dasarnya merupakan bahan bakar yang didapat dari pembusukan organisme jutaan tahun lalu. Sumber energi fosil merupakan salah satu energi yang mayoritas digunakan terlebih pada negara berkembang. Penggunaan bahan bakar fosil yang terus menerus tentunya akan mengakibatkan persediaan semakin sedikit. Penggunaan bahan bakar fosil yang berkepanjangan juga dapat merusak dan berbahaya pada lingkungan dan kehidupan manusia.

Bahan bakar fosil yang masih digunakan secara umum di Indonesia adalah batu bara. Berdasarkan data dari badan pusat statistik (BPS) produksi batu bara tahun 2021 mencapai 614.058.577 ton. Saat ini penggunaan batu bara sebagian besar dialokasikan pada sektor pembangkit listrik dan membutuhkan batu bara sebesar 112.133.733 ton untuk bahan bakar pembangkit. Berdasarkan data penggunaan, pada tahun 2100 cadangan batu bara akan habis jika penggunaan batu bara tidak dapat dikontrol dengan baik dan tidak adanya sumber energi penggantinya (Badan Pusat Statistik, 2021)

Penghasil emisi terbesar di Indonesia salah satunya merupakan batu bara, penyebabnya dikarenakan pembangkit listrik di Indonesia Sebagian besar masih bergantung pada penggunaan batu bara. Listrik yang dihasilkan di Indonesia sebesar 60% menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Pada sub-sektor pembangkit listrik, batu bara berkontribusi 86% dari total keseluruhan emisi yang dihasilkan (Arinaldo, dkk., 2019). Emisi merupakan zat sisa dari hasil proses pembakaran yang bersifat beracun dan dapat membahayakan makhluk hidup serta mencemari lingkungan. Selain itu batu bara juga banyak digunakan sebagai sumber energi di berbagai bidang industri yang ada di Indonesia.

Emisi gas buang seperti partikel, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan CO<sub>2</sub> dihasilkan selama pembakaran batu bara. Emisi gas buang tersebut diproyeksikan meningkat mulai dari tahun 1997-2025 dengan kisaran angka peningkatan sebesar 6-7% per tahun. Tingkat emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> pada tahun 2025 diperkirakan berkisar pada angka 1,2 juta ton sementara itu untuk CO<sub>2</sub> akan berada pada kisaran 180 juta ton. Peningkatan emisi gas buang ini dapat diakibatkan karena penggunaan batu bara yang semakin pesat. Sehingga emisi gas buang tersebut harus diminimalisir agar mengurangi pencemaran lingkungan akibat emisi gas yang dihasilkan (Djayanyi, 2011)

Pemakaian bahan biomassa dalam sistem pembangkit batu bara merupakan salah satu cara yang dapat dipertimbangkan untuk mengurangi dampak emisi lingkungan dari batu bara. Penggunaan biomassa akan lebih menguntungkan dari segi emisi yang dihasilkan selama proses pembakarannya. Biomassa merupakan bakar yang tidak berkontribusi pada

peningkatanan emisi CO<sub>2</sub> dikarenakan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pembakaran biomassa akan diserap kembali oleh tanaman selama masa hidupnya (BPPT, 2017). Manfaat yang dapat diperoleh dari penggunaan biomassa sebagai bahan bakar salah satunya adalah biomassa akan mengimbangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara.

Kementerian energi dan sumber daya mineral menyebutkan bahwa untuk meningkatkan serta menuju *net zero emission* dimasa depan sehingga pemanfaatan biomassa pada sistem pembangkit harus dijalankan. Penggunaan biomassa sebagai bahan pembangkit energi juga dapat memberikan dampak dan efek positif bagi pengembangan ekonomi kerakyatan. Hal tersebut dapat terjadi karena dapat membuka lapangan kerja serta peluang kerja dan bisnis pada sektor biomassa yang berbasis sampah dan limbah.

Sumber yang menyumbang besar potensi energi biomassa Indonesia salah satunya adalah sektor perkebunan kelapa sawit. Luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 14,32 juta hektar. Masing-masing untuk perkebunan sawit besar seluas 8,51 juta hektar dengan produksi kelapa sawit 26,57 juta ton. Perkebunan kelapa sawit rakyat seluas 5,81 juta hektar dengan produksi sebesar 13,99 juta ton sehingga dengan total sebesar 40,56 juta ton kelapa sawit (Badan Pusat Statistik, 2021).

Proses pengolahan kelapa sawit untuk menjadi minyak kelapa sawit tentunya membutuhkan banyak proses. Dari proses tersebut, limbah kelapa

sawit yang berbentuk tandan kosong kelapa sawit mencapai 23,61% dari satu buah tandan buah segar pasca panen. Sehingga dapat dikatakan bahwa dari 40,56 ton produksi buah kelapa sawit dapat menghasilkan limbah tandan kosong kelapa sawit sebesar 9,57 ton.

Emisi yang dihasilkan oleh pembakaran batu bara dapat dikurangi dengan menggunakan biomassa sebagai bahan bakar campurannya. Dan secara umum penggunaan pembakaran bersama (*cofiring*) dapat menurunkan kadar emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang dihasilkan pada pembakaran. Kecilnya kadar sulfur pada biomassa serta rendahnya temperatur pembakaran biomassa membuat  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada hasil pembakaran menjadi lebih rendah (Sung dkk., 2016).

Perlakuan *air fuel ratio* (AFR) dalam pembakaran dapat menekan emisi yang dihasilkan pada proses pembakaran. Dengan adanya udara berlebih dapat membuat pembakaran menjadi lebih sempurna dan menekan jumlah gas CO yang terbentuk. Hal ini juga dapat mengurangi emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  karena dengan adanya udara berlebih maka dapat mengurangi temperatur pembakaran (Xue dkk., 2020).

Berdasarkan penjabaran di atas dapat dilihat bahwa sudah dilakukan beberapa penelitian mengenai karakteristik emisi dari hasil pembakaran dari biomassa. Salah satu sumber biomassa terbesar di Indonesia adalah biomassa dari perkebunan kelapa sawit. Maka dari itu penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai karakteristik emisi tandan kosong kelapa

sawit tertorefaksi yang dihasilkan dari pembakaran dengan menggunakan *pulverized burner* dengan variasi AFR.

## 1. 2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik emisi pembakaran yang dihasilkan pada proses pembakaran *co-firing* batu bara dan tandan kosong kelapa sawit.
2. Mengetahui pengaruh dari variasi *air fuel ratio* (AFR) terhadap emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran.

## 1. 3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yang dilakukan adalah:

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

## 1. 4. Batasan Masalah

Agar penelitian dapat terfokus pada tujuan yang ingin dicapai, maka berikut merupakan batasan masalah yang diberikan:

1. Menggunakan bahan baku biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi
2. Menggunakan jenis batu bara sub-bituminus B
3. *Co-combustion* menggunakan sistem *pulverized*

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Biomassa

Biomassa merupakan salah satu istilah kepada material yang berbahan organik. Biomassa terbentuk dari tanaman hijau. Biomassa merupakan sumber energi paling penting di setiap wilayah pada saat ini. Potensi biomassa menjadi sumber energi utama dimasa depan, dan menjadi kontributor penting untuk pengembangan energi berkelanjutan di masa mendatang, khususnya di negara-negara industri maupun negara berkembang (Al-Maari dkk., 2021)

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang tersebar luas yang dapat digunakan untuk proses termal atau untuk konversi menjadi bahan bakar yang lebih ekonomis. Peningkatan pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar terus dikembangkan pada setiap tahunnya, karena penggunaan biomassa sebagai bahan bakar menghasilkan emisi polutan yang lebih rendah.

#### 2.1.1 Pemilihan jenis biomassa

Ada beberapa spesifikasi khusus yang harus dimiliki biomassa untuk digunakan pada proses pembakaran bersama 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. Nilai panas yang rendah dihitung dengan mengurangi energi yang dibutuhkan dengan penguapan kadar kelembaban pada bahan bakar. Bahan bakar biomassa mempunyai nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan batu bara. C (*carbon*) dan H (*hidrogen*) cenderung menaikkan nilai kalor sementara oksigen menguranginya. Kadar *lignin* dan *lignoselulosa* bahan bakar umumnya memiliki korelasi yang kuat dengan nilai kalor. Nilai kalor yang tinggi dari *lignin* dilaporkan menjadi lebih tinggi dibandingkan *lignoselulosa* dan *hemiselulosa*. Kemudian nilai kalor yang rendah akan menaikkan derajat dari oksidasi.

## 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. Nilai kalor dari bahan bakar berkurang dengan meningkatnya kadar air. Untuk *bio fuel* yang mempunyai kadar air yang sangat tinggi, beberapa masalah mungkin dialami selama pembakaran.

Tingginya kadar air dapat menyebabkan persoalan pembakaran dan mengurangi temperatur pembakaran yang mengganggu pembakaran

dari hasil reaksi dan sebagai akibat efek kualitas pembakaran. Selanjutnya, kadar air yang tinggi berperan penting untuk penggunaan bahan bakar yang menghasilkan jumlah gas sisa yang besar oleh karena itu memerlukan ukuran alat yang besar. Kehadiran air pada biomassa mempengaruhi sifat selama proses pirolisis (tingkat perubahan utama selama proses pembakaran) dan efek sifat fisik serta kualitas dari gas pirolisis.

### 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*. Kandungan abu sangat penting karena dapat menyebabkan endapan abu yang tidak diinginkan pada permukaan perpindahan panas di dalam *boiler*. Hal ini akan mengurangi efisiensi perpindahan panas *boiler* dan dapat menyebabkan banyak masalah operasional *boiler*. Produsen *boiler* menentukan persentase kandungan kadar abu yang diizinkan dalam bahan bakar yang di bakar di dalam tungku. Untuk Pembangkit Listrik Lakvijaya, kisaran yang diizinkan adalah 4,5% - 16% .

### 4. Pertumbuhan yang menguntungkan dan keamanan pasokan

Untuk keberlangsungan bahan bakar perlu pemilihan biomassa yang akan digunakan dalam *co-combustion*. Dengan memperhatikan aspek pertumbuhan biomassa dalam hal keuntungan dan keamanan pasokan. Salah satunya adalah potensi dari limbah TKKS . Biomassa dapat dibedakan dalam tiga kelompok besar, yaitu biomassa kayu, biomassa

bukan kayu, dan bahan-bakar sekunder. Sedangkan Biomass Energy Europe, membagi biomassa ke dalam empat kategori yaitu, biomassa hutan dan limbah hutan, tanaman energi, limbah pertanian, dan limbah organik. Pada penelitian ini secara umum bertujuan untuk melakukan pemanfaatan potensi energi biomassa dari hasil limbah perkebunan kelapa sawit.

### **2.1.2 Potensi biomassa perkebunan kelapa sawit**

Wilayah yang memiliki jumlah perkebunan kelapa sawit terluas di Indonesia salahsatunya Provinsi Riau, luas areal perkebunan kelapa sawit rakyat di Provinsi Riau secara keseluruhan adalah 2.401.460 ha yang tersebar pada 12 Kabupaten. Dari total luas perkebunan yang ada 461.007 ha kebun sawit telah menghasilkan dengan total produksi 4.477.081 ton. Wilayah perkebunan sawit rakyat terbesar terdapat di Kabupaten Indragiri Hilir, dengan luas areal tanaman mencapai 580.627 Ha (24,1%).

Dari Kabupaten Indragiri Hilir tersebut selama tahun 2012 dapat dihasilkan sebanyak 644.098 Ton kepala sawit. Wilayah lainnya di Provinsi Riau yang memiliki potensi sumber daya kelapa sawit rakyat cukup besar terdapat di Kabupaten Rokan Hulu dan Kabupaten Kampar dengan luas perkebunan sawit masing-masing mencapai 256.696 ha (10,7%) dan 289.156 ha (12,1%). Dari kedua wilayah tersebut, selama tahun 2012 telah diproduksi sebanyak masing-masingnya 579.011 ton (12,9%) dan 573.338 ton (12,8%) tandan

buah segar (TBS). Tandankosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah utama berlignoselulosa yang belum dimanfaatkan secara optimal dari industri pengolahan sawit. TKKS merupakan limbah padat terbesar yang dihasilkan oleh perkebunan kelapa sawit (PKS). Kompisis kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 2.1.



**Gambar 2. 1 Potensi Biomassa Kelapa Sawit  
(Badan pusat statistik, 2021)**

Presentase tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap tandan buah segar (TBS) sekitar 22–23% atau sebanyak 220–230 kg TKS. Jika PKS berkapasitas 100 ton/jam maka dihasilkan sebanyak 22–23 ton TKS. Jumlah limbah TKS seluruh Indonesia pada tahun 2004 diperkirakan mencapai 18.2 juta ton dengan nilai kalor TKS adalah 18790 kJ/kg.

Dari analisis ultimat dan prolsimat yang dilakukan pada sampel mentah dan sampel hasil torefaksidiperoleh data seperti yang ditampilkan pada Gambar berikut:

Sampel	Analisis Proximate				Analisis Ultimate				Perbandingan	
	MC (%)	VM (%)	FC (%)	Abu (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	O/C (%)	H/C (%)
<b>M</b>	11.63	73.57	10.80	4	42.93	5.56	2.16	49.35	1.15	1.55
<b>A</b>	7.21	76.60	11.20	5	45.79	5.85	2.15	46.21	1.01	1.53
<b>B</b>	7.10	73.80	12.10	7	46.60	6.09	1.33	45.98	0.99	1.57
<b>C</b>	5.51	69.10	18.40	7	50.19	4.58	1.78	43.45	0.87	1.10
<b>D</b>	6.33	65.97	20.70	7	52.78	5.89	1.58	39.75	0.75	1.34
<b>E</b>	4.31	61.40	25.30	9	53.95	4.27	1.95	39.83	0.74	0.95

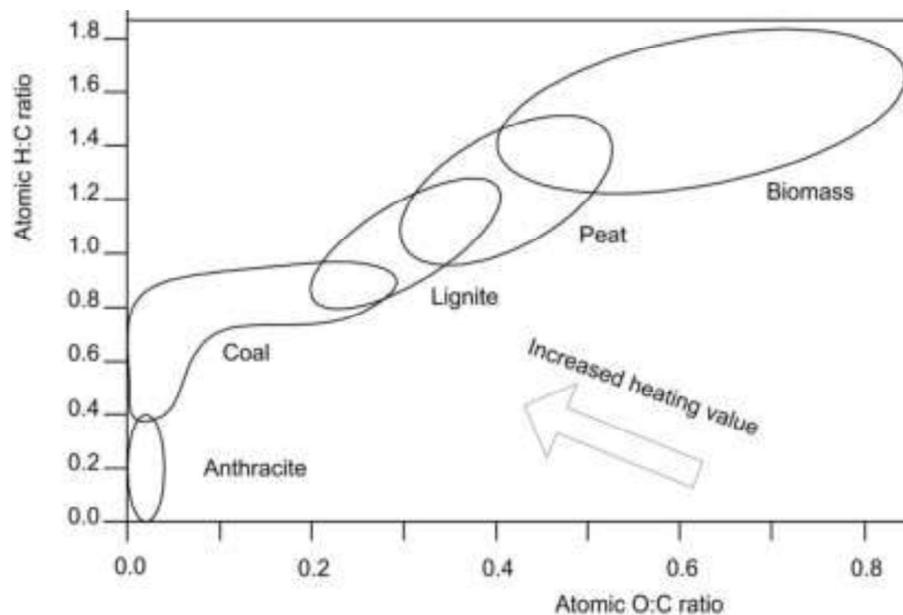
Gambar 2. 2 Analisis proksimat dan ultimat TKKS

(Wahyudi dkk., 2020)

Biomassa umumnya memiliki kadar air yang tinggi dibandingkan dengan batu bara. Kandungan air yang tinggi akan mempengaruhi pada distribusi bahan bakar dan juga penyimpanan bahan bakar itu sendiri. Kemampuan bahan bakar untuk menyerap air disebut juga sebagai hidrofobik. Biomassa tandan kosong kelapa sawit setelah dilakukan torefaksi meningkatkan kemampuan dalam menyerap air. Berbeda dengan TKKS mentah sebelum dilakukan torefaksi kemampuan dalam penyerapan air masih rendah sehingga air yang mampu diserap oleh TKKS mentah lebih tinggi di bandingkan dengan yang telah di torefaksi. Semakin tinggi temperatur torefaksi yang dilakukan dapat disimpulkan kemampuan penyerapan air lebih tinggi sehingga air yang mampu diserap semakin sedikit. Kemampuan hidrofobik sendiri dapat terjadi karena berkurangnya kadar alami yang ada pada material dan membuat kadar karbon menjadi lebih dominan daripada kadar yang lainnya.

### 2.1.3 Upgrading biomassa

Tandan kosong kelapa sawit diketahui mengandung kadar air yang sangat tinggi sekitar 60-65%, dan mengandung potasium (K) yang mencapai 2,4% (Nasrin dkk., 2008), selain itu juga diketahui mengandung klorin (Cl). Efek korosi akan meningkat dengan meningkatnya kandungan Cl, dan unsur potasium dapat berperandalam pembentukan deposit pada *superheater* yang dapat mengganggu proses perpindahan panas di tungku bakar. Perlu adanya *upgrading* dari biomassa untuk meningkatkan kualitasnya sehingga layak di jadikan bahan bakar yang di harapkan. Salah satu *upgrading* yang dapat dilakukan yaitu torefaksi. Perlakuan torefaksi juga tentunya dapat meningkatkan densitas energi biomassa dengan mengurangi kandunngan oksigen dan menjadikan biomassa mendekati karakteristik batu bara (Thaim, Rasid, dkk., 2019).



Gambar 2. 3 Komposisi kimia dari berbagai bahan bakar padat (Koppejan, 2016).

Komposisi utama kandungan kimiawi biomassa dibandingkan dengan bahan bakarlainnya diilustrasikan pada Gambar 2.5. dibandingkan dengan bahan bakar lain, biomassa mengandung tingkat hidrogen dan oksigen yang relatif tinggi (Koppejan, 2016). Sehingga dengan dilakukanya proses torefaksi bertujuan untuk meningkatkan grindabilitas biomassa dan meningkatkan sifat-sifat dari biomassa. Biomassa dapat di tingkatkan melalui torefaksi basah atau kering.

*Dry torefaction (DT)* adalah pra-perlakuan termokimia dari biomassa yang dilakukan pada temperatur 200° dan 300° di bawah lingkungan gas inert pada tekanan atmosfer 34-36. Proses DT dapat dibagi menjadi beberapa tahapan, seperti pemanasan, pengeringan, torefaksi dan pendinginan. Ada lima tahapan utama yang ditentukan dalam proses torefaksi (Stelte dkk., 2012).

1. Pemanasan awal (*Initial Heating*)

Tahap awal biomassa di panaskan sampai pengeringan biomassa tercapai. Dalam tahap ini suhu meningkat dan pada akhir tahap kelembapan mulai menguap.

2. Pra-Pengeringan (*Pre-Drying*)

Pada temperatur konstan 100°C kandungan air dalam biomassa menguap.

3. *Post-drying and intermediate heating*

Temperatur biomassa meningkat hingga 200°C, air dan massa yang ada di dalam biomassa secara fisik dilepaskan.

4. Torefaksi kering (*Dry Torrefaction*)

Proses torefaksi terjadi pada temperatur 200°C dan berakhir ketika proses kembali di dinginkan dari temperatur spesifik menuju temperatur 200°C dan pada temeperatur ini disebut sebagai temperatur konstan maksimum.

5. Pendinginan padatan (*Solids cooling*)

Produk torefaksi kemudian di dinginkan di bawah temperatur 200°C hingga suhu terakhir yang diinginkan yaitu suhu ruangan.

*Dry torrefaction* (DT) telah banyak digunakan sebagai langkah perlakuan awal sebagai Teknik korversi biomassa seperti gasifikasi dan pembakaran bersama (*Co-combustion*). Perlakuan termal tidak hanya menghancurkan struktur berserat dan keuletan yang ada di biomassa tetapi juga di kenal untuk meningkatkan nilai kalordari biomassa. Grindabilitas dapat juga di tingkatkan dengan metode DT, hal ini telah di pelajari oleh *Research Center Netherlands* (ECN) yang mempelajari kemampuan gerindabilitas dari beberapa bahan baku biomassa kayu, *biomassa torrefied* dan batu bara.

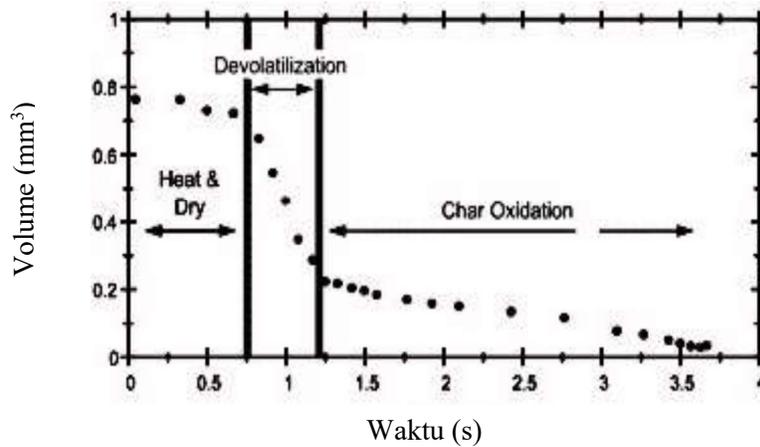
#### 2.1.4 Pemanfaatan biomassa

Pembakaran bersama biomassa dengan bahan bakar lainnya masih jarang digunakan. Sumber energi utama di banyak bagian dunia sebagian besar adalah bahan bakar fosil. Faktanya 79% dari penggunaan energi dunia bergantung pada bahan bakar fosil. Mengenai penggunaan biomassa di Eropa sebagai sumber energi, lebih dari 40% pasokan energi Uni Eropa

bergantung pada minyak yang diimpor dari negara-negara OPEC. Peneliti memperkirakan bahwa di tahun-tahun mendatang, akan ada peningkatan ketergantungan pada impor minyak dan gas. Ini akan menghasilkan lebih besar impor di Uni Eropa (UE) naik 70% pada tahun 2030. Energi yang diperoleh dari bahan biomassa dapat melalui kombinasi (langsung atau tidak langsung) atau melalui proses konversi termokimia atau biologis. Dalam kedua contoh, energi yang diperoleh adalah dalam bentuk panas atau listrik. Pembakaran bersama dengan biomassa adalah metode yang lebih minati dalam hal pengurangan emisi berbahaya dan menurunkan biaya produksi energi.

### **2.1.5 Proses pembakaran biomassa**

Proses pembakaran biomassa melibatkan sejumlah aspek fisik atau kimia dengan kompleksitas tinggi. Sifat proses pembakaran tergantung pada sifat bahan bakar dan aplikasi pembakaran. Proses konversi pembakaran dapat dibagi menjadi beberapa proses umum seperti, pengeringan, pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran. Pengeringan, pirolisis, dan gasifikasi akan selalu menjadi langkah pertama dalam proses pembakaran bahan bakar padat. Penerapannya bervariasi, tergantung pada teknologi pembakaran yang diterapkan, sifat bahan bakar dan kondisi proses pembakaran. Dalam penerapan pada tungku pembakaran akan ada beberapa tahapan yang berbeda antara fase pembakaran volatil dan char, baik dalam posisi dan waktu tinggal. Gambar 2.4. menunjukkan secara kualitatif tahapan proses pembakaran untuk partikel biomassa.



Gambar 2. 4 Pembakaran biomassa dalam tahap berbeda (Koppejan, 2016).

### 2.1.6 Konsentrasi dan relevansi C, H, O dan volatile

Dalam bahan bakar biomassa komponen utamanya adalah C, H dan O. Senyawa atom C dan H di oksidasi selama pembakaran oleh reaksi eksotermik (pembentukan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ ). Oksigen yang terikat secara organik dilepaskan melalui dekomposisi termal bahan bakar biomassa. Oksigen berlebih diperlukan untuk reaksi pembakaran yang sempurna. Karbon tetap dalam bahan bakar biomassa hadir dalam bentuk teroksidasi sebagian, yang menjelaskan rendahnya GCV (*gross calorific value*) bahan bakar biomassa, dibandingkan dengan batu bara. Konsentrasi C dari bahan berkayu (termasuk kulit kayu) lebih tinggi dari pada bahan bakar biomassa dari jenis rerumputan, yang menjelaskan GCV bahan bakar kayu sedikit lebih tinggi (lihat Tabel 2.1). Konsentrasi C residu zaitun lebih tinggi dari pada bahan bakar kayu, yang juga menghasilkan GCV yang lebih tinggi.

Tabel 2. 1 Konsentrasi C, H, O dan volatil bahan bakar biomassa

Jenis bahan bakar	C (wt%)	H (wt%)	O (wt%)	volatiles (wt%)
Sebuk kayu	47,–51,6	6,1–6,3	38.0–45.2	76.0–86.0
Kulit pohon	48,8–52,5	4,6–6,1	38.7–42.4	69.6–77.2
Jerami	43,2–48,1	5–6	36.0–48.2	70.0–81.0
Miskantus	46,7–50,7	4,4–6,2	41.7–43.5	77.6–84.0
Residu zaitun	51–54,9	6,6–7,2	34.1–38.0	n.m.

Jumlah zat volatil dalam bahan bakar biomassa lebih tinggi dari pada batu bara, dan kandungannya bervariasi antara 70 dan 86%. Jumlah zat volatil yang tinggi pada biomassa, sebagian besar diuapkan sebelum reaksi pembakaran fasa gas homogen terjadi, padatan yang tersisa kemudian mengalami reaksi pembakaran yang heterogen. Oleh karena itu, jumlah zat volatil sangat mempengaruhi dekomposisi termal dan perilaku pembakaran bahan bakar padat.

## 2.2 Batu bara

Batu bara merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui karena membutuhkan waktu jutaan tahun hingga terbentuk batuan sedimen organik yang termasuk ke dalam bahan bakar fosil. Batu bara adalah batuan sedimen organik yang mudah terbakar karena memiliki kandungan karbon yang tinggi. Sifat fisik dan kimia batu bara bergantung pada derajat evolusi atau peringkat selama masa geologisnya. Sebagian besar kandungan batu bara terdiri dari bahan organik yang berasal dari sisa-sisa tumbuhan.

Batu bara masih menjadi sumber energi yang utama dalam pembangkit listrik di dunia. Sebagai bahan bakar fosil termurah dan ketersediaannya yang 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. Batu bara menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan impor energi suatu negara, karena biaya pemrosesan batu bara sebagai sumber energi relatif rendah.

Namun batu bara memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, terutama emisi CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> yang ditimbulkan.

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:

### 2. 2. 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 2.200 sampai 4.600 kkal/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. 2. 2 *Sub bituminous*

Batu bara sub bituminous memiliki kemiripan seperti batu bara bituminous, dengan warna hitam terang hingga coklat tua kusam. Batu bara sub bituminous memiliki nilai kalor yang lebih sedikit. Batu bara sub bituminous mempunyai tekstur yang keras dan kuat hingga lunak

dan rapuh. Sub bituminous digunakan dalam pembangkit tenaga uap dan industri. Pembakaran batu bara sub bituminous menghasilkan abu yang sifatnya lebih basa dibanding abu hasil pembakaran batu bara jenis yang lain. Penggunaan batu bara sub bituminous memiliki keuntungan mengurangi hujan asam yang disebabkan oleh emisi pembakaran batu bara. Tabel 2.2 dan 2.3 berikut menunjukkan karakteristik dan analisis ultimat dari batu bara sub bituminous.

Tabel 2. 2 Karakteristik batu bara *sub bituminous* (Souza-Santos, 2010)

Komponen	% Massa, basis basah
Kadar air	5,00
Volatil	38,00
Karbon tetap	47,60
Abu	9,40
HHV (kkal/kg) (pada basis kering)	7.300

Tabel 2. 3 Analisis ultimat batu bara *sub bituminous* (Souza-Santos,2010)

Komponen	% Massa, basis kering
C	73,2
H	5,1
O	7,9
N	0,9
S	3,0

Pembakaran campuran batu bara bituminous dengan sub bituminous akan menghasilkan produk samping alkalin yang dapat mengikat

senyawa belerang yang dihasilkan oleh batu bara bituminous, sehingga mampu mengurangi pembentukan kabut asam di udara. Emisi karbon monoksida yang dihasilkan dari pembakaran batu bara sub bituminous dapat dikurangi dengan menaikkan temperatur pembakaran menjadi lebih tinggi. Bongkahan besar batu bara sub bituminous yang dibakar akan menghasilkan lebih sedikit asap dan tidak menghasilkan arang, namun kadar abu yang dihasilkan lebih tinggi sehingga berbahaya.

### 2. 2. 3 *Bituminous*

Merupakan batu bara yang paling umum untuk digunakan di seluruh dunia, batu bara bituminous dikenal sebagai batu bara hitam dan lunak yang terlihat halus dan biasanya berkilau. 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 kkal/kg. Batu bara jenis ini biasanya digunakan untuk menghasilkan listrik dan digunakan sebagai bahan bakar dalam industri baja maupun besi.

### 2. 2. 4 *Antrasit*

Berdasarkan perspektif geologis, antrasit merupakan jenis batu bara yang tertua sehingga dianggap sebagai batuan metamorf batu bara dengan peringkat tertinggi. Antrasit mempunyai kandungan karbon tetap yang tinggi dengan kandungan sulfur dan nitrogen yang rendah. Nyala api yang dihasilkan berwarna biru dengan temperatur yang

sangat tinggi. 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. Hanya sedikit pembangkit listrik tenaga batu bara yang menggunakan antrasit karena pembakarannya lambat dan sulit untuk dinyalakan.

Batu bara dengan biomassa memiliki beberapa kesamaan dalam hal komposisi kimiawi yang dimiliki. Komposisi yang dimiliki oleh biomassa memang cenderung lebih rendah daripada komposisi yang dimiliki oleh batu bara terlebih dari nilai kalor yang dimiliki. Torefaksi pada biomassa tentunya dapat meningkatkan serta membuat sifat biomassa menjadi menyerupai sifat yang dimiliki oleh batu bara (Wahyudi et al., 2020).

Tabel 2. 4 Persentase karakteristik batu bara dan Kayu

Unsur	Antrasit (%)	Bituminus (%)	Lignit (%)	Kayu (%)
Abu	2,4	1,8	5	0,1
Karbon	94,88	89,47	72,38	47,4
Hidrogen	1,83	4,93	5,30	5,2
Nitrogen	0,67	1,66	1,12	0,01
Oksigen	1,78	3,49	20,53	37,9

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. Tabel 2.2 memberikan perbandingan elemen (persentase) susunan Antrasit, Bituminus, Lignit, dan Kayu.

### 2.3 *Co-combustion*

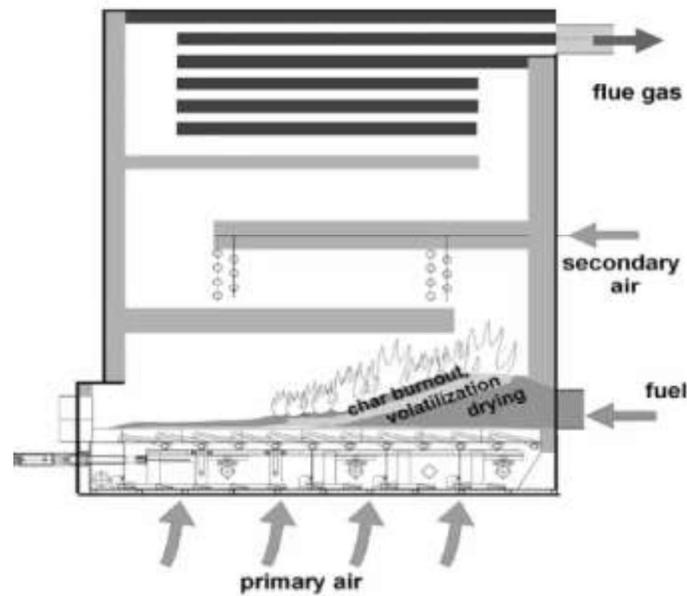
*Co-combustion* merupakan proses pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda pada *boiler* yang sama atau berbeda untuk menghasilkan energi. Tujuan utamanya adalah mengganti bahan bakar primer dengan bahan bakar sekunder untuk mencapai berbagai manfaat. Dalam konteks global saat ini, dua bahan bakar yang akan digunakan dalam sebagian besar kasus adalah batu bara dan biomassa. Penggunaan biomassa dalam *co-combustion* salah satunya pada PLTU yang ada di Indonesia dengan jenis pulverized coal dengan penggunaan biomassa sebanyak 5% (Humas EBTKE, “Terapkan metode *co-firing* di PLTU”, [www.ebtke.esdm.go.id](http://www.ebtke.esdm.go.id), 2020). Kekhawatiran global tentang efek emisi GRK dari pembakaran bahan bakar fosil telah mendorong inisiatif mencari jalur alternatif untuk mengurangi emisi dari pembangkit listrik tenaga batu bara. Biomassa merupakan bahan bakar yang memiliki zat netral karbon yang dapat mengurangi permasalahan emisi yang ditimbulkan. Dari berbagai jenis biomassa dan treatment yang telah dilakukan layak untuk dijadikan pembakaran bersama dengan batu bara.

Proses pembakaran partikel bahan bakar dalam percobaan pembakaran partikel tunggal menunjukkan dua tahap yaitu terjadi pembakaran volatil terlebih dahulu dan dilanjutkan pembakaran arang. Penelitian terbaru yang terkait dengan biomassa TKKS belum banyak yang memberikan informasi mengenai emisi yang ditimbulkan. Untuk karakteristik pembakaran *co-combustion* menggunakan sampel cangkang inti sawit (PKS) sebagai biochar dan Yangquan batu bara antrasit (YQ). PKS didevolatilisasi selama 60 menit menggunakan tungku tabung kontinu di bawah atmosfer nitrogen pada suhu 600 °C. Hasil arang cangkang kelapa sawit (PKS) adalah 31,93% (Wang dkk., 2021)

*Co-combustion* merupakan proses pembakaran langsung dengan mengkombinasikan bahan bakar antara batu bara dengan biomassa untuk menghasilkan energi dengan menggunakan tungku *fixed bed combustion*, *fluidized bed combustion*, dan *pulverized fuel combustion*.

### 2.3.1 *Fixed bed combustion*

*Fixed bed combustion* biasanya menggunakan batu bara dengan ukuran 3mm hingga 50mm. Batu bara diposisikan diatas perapian dengan udara yang telah dipanaskan sebelumnya. Penggunaan udara sekunder digunakan diatas batu bara untuk membakar zat volatil. Sistem *fixed bed combustion* merupakan sistem pembakaran yang digunakan dengan kontak langsung. Reaktor berbentuk seperti tempat tidur sehingga bahan bakar yang digunakan tidak bergerak, sedangkan udara dialirkan melalui tempat tidur untuk membakar bahan bakar (Koppejan, J., 2016).

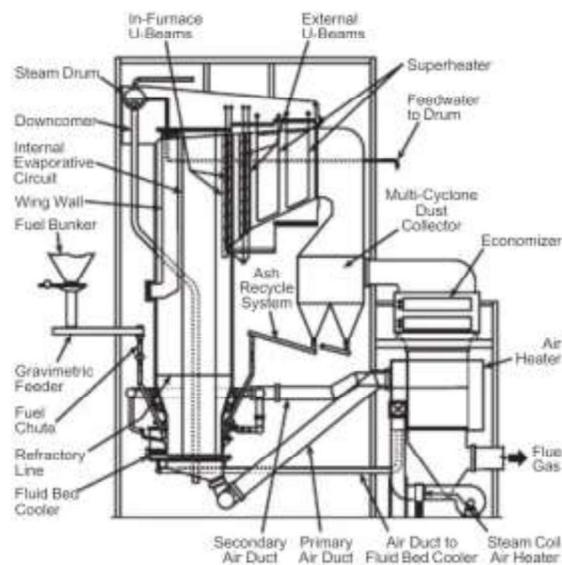


Gambar 2. 5 *Fixed bed combustion*

(Koppejan, J., 2016)

### 2.3.2 *Fluidized bed combustion*

Pembakaran dengan sistem *fluidized bed* menggunakan bahan bakar yang telah diolah agar bahan bakar dapat bersifat seperti fluida dengan aliran udara yang dibuat.

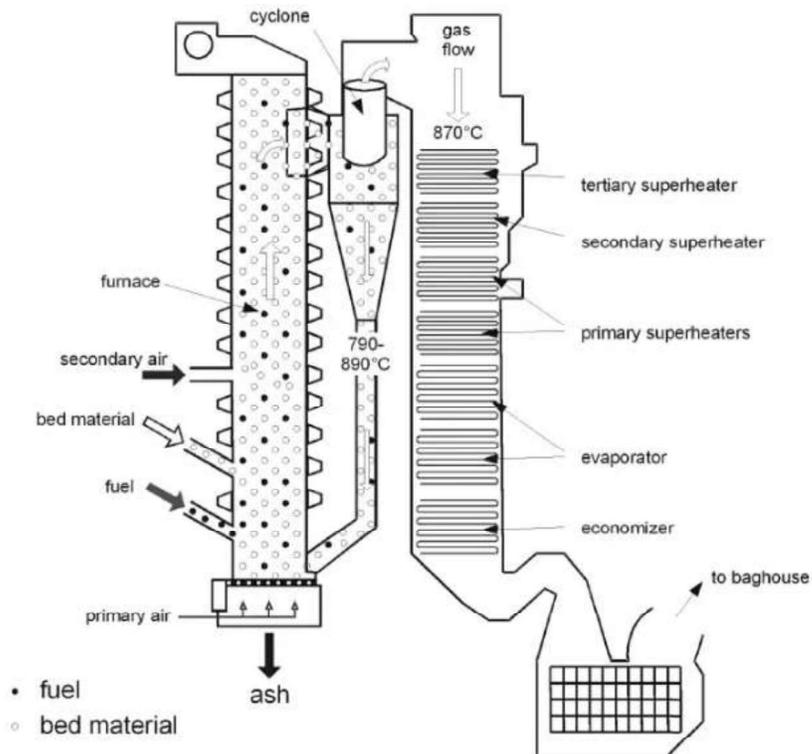


Gambar 2. 6 *Fluidized bed combustion*

(Babcock & Wilcox Company, 2015)

### 2.3.3 Pulverized fuel combustion

Pembakaran dengan sistem *pulverized fuel combustion* menggunakan bahan bakar yang halus yang kemudian diinjeksikan kedalam ruang bakar dengan pneumatik. Pembakaran menggunakan metode bahan bakar padat yang diubah menjadi partikel dengan ukuran yang kecil sebelum dibakar. Proses pembakaran dengan metode *pulverized* digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap untuk menghasilkan panas.



Gambar 2. 7 *Pulverized fuel combustion*

(Koppejan, J., 2016)

## 2.4 Pembakaran

Proses pembakaran diartikan sebagai reaksi eksotermik secara cepat yang diikuti oleh pelepasan energi substansial yaitu panas dan api sebagai reaksi pembakaran dengan kemampuan untuk merambat melalui media tertentu. Perambatan tersebut dihasilkan karena rantai

yang kuat dari reaksi pembakaran dengan proses perpindahan molekuler. Proses kimia dan fisika proses pembakaran adalah penghancuran dan penataan ulang dari beberapa molekul, yang kemudian dengan cepat melepaskan energi dalam selang waktu yang singkat.

Pembakaran merupakan peristiwa yang dinamis, dimana proses yang terjadi pada tingkat molekuler diantara atom, molekul, radikal, dan batasan padat yang bergantung pada waktu pembakaran. Kemudian reaksi yang cepat akan menghasilkan gradien yang proses perpindahannya diubah menjadi panas dan jenis fluks yang mempercepat reaksi. Proses pembakaran menghasilkan polusi udara, pembentukan polutan, dan oksidasi kinetika yang dapat direduksi menggunakan beberapa teknik yang tepat.

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 merupakan hasil kontak langsung antara oksigen dengan bahan bakar pada kondisi temperatur yang tinggi di ruang bakar.

#### 2. 4. 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. 4. 2 Temperatur Pembakaran

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

#### 2. 4. 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 akan membuat proses pembakaran terjadi dengan sempurna.

Kandungan yang dimiliki oleh bahan bakar yang dapat membentuk reaksi pembakaran dengan oksigen merupakan hydrogen, 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 hydrogen



Reaksi pembakaran sulfur



## 2.5 Mekanisme Pembakaran

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

### 2. 5. 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  $\pm 105$  °C di dalam reaktor.

### 2. 5. 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. 5. 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. 5. 4 Oksidasi Arang

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

#### 2. 5. 5 Pembentukan Emisi

Oksidasi volatil merupakan reaksi yang mempengaruhi pembentukan polutan seperti karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), dan nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) yang dilepaskan sebagai emisi ke udara.

#### 2. 5. 6 Reaksi Bahan Anorganik

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

kotoran, serta emisi partikulat.

#### 2. 5. 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.

### 2.6 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 CO<sub>2</sub> merupakan indikator penting dari efisiensi pembakaran. Guo dan Zhong (Guo & Zhong, 2018) menggunakan persamaan berdasarkan kadar CO dan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pembakaran seperti berikut:

$$\eta = \frac{C_{CO_2}}{C_{CO} + C_{CO_2}} 100 \% \quad (5)$$

### 2.7 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. 7. 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. 7. 2 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. 7. 3 Udara tersier

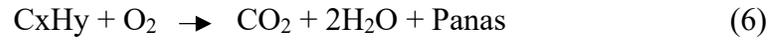
Dalam penggunaan *boiler*, penggunaan udara sekunder dapat dibagi lagi. Untuk turbulensi tambahan dibutuhkannya udara tambahan yaitu udara tersier. Udara tersier merupakan udara yang diberikan pada sudut tajam atau bahkan tegak lurus terhadap nyala api sehingga dapat menyebabkan turbulensi yang cukup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

## 2.8 Air Fuel Ratio (AFR)

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 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):

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{M_a \dot{N}}{M_f \dot{N}_f} \quad (7)$$

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):

$$FAR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{M_f \dot{N}_f}{M_a \dot{N}} \quad (8)$$

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) actual atau dapat menjadi sebagai pembanding rasio bahan bakar – udara (FAR) actual dengan stoikiometrik (Nursatria A., 2015).

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \quad (9)$$

- $\Phi > 1$  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)

## 2.9 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:  $x = b$

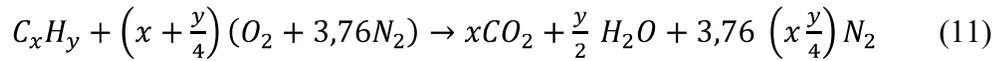
Kesetimbangan H:  $y = 2c \rightarrow c = y/2$

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:

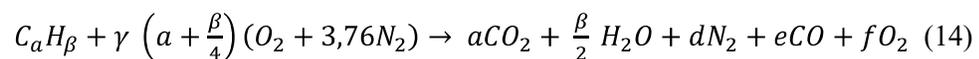
$$m_{O_2} = \frac{m_{atom O_2}}{m_{mol C_xH_y}} \times \text{persentase } C_xH_y \text{ (kg/kg bahan bakar)} \quad (12)$$

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

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum N_i \bar{M}_i)_{air}}{(\sum N_i \bar{M}_i)_{fuel}} = \frac{\left(x + \frac{y}{4}\right) \bar{M}_{O_2} + 3,76 \left(x + \frac{y}{4}\right) \bar{M}_{N_2}}{x \bar{M}_C + y \bar{M}_H} \quad (13)$$

## 2.10 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 ( $C_aH_\beta$ ) dapat ditulis menjadi (Cengel dkk., 2010):



### 2.11 Udara Berlebih (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:

$$\%XSA = \frac{(X_{O_2})_{prod}}{(X_{N_2})_{prod}/3,76 - (X_{N_2})_{prod}} \quad (15)$$

### 2.12 Pengaruh Udara Berlebih Pada Emisi

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 NO<sub>2</sub>. Dimana kadar NO<sub>2</sub> pada pembakaran batu bara dan *co-firing* menjadi berkurang pada penggunaan udara sekunder.

### 2.13 Emisi

Emisi dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan salah satu konsentrasi permasalahan dalam penggunaan bahan bakar fosil dimana emisi yang dihasilkan dapat membahayakan kesehatan publik. Produk utama pembakaran karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan air (H<sub>2</sub>O) 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<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) dan jelaga (Ling, 2006).

Dalam pembakaran batu bara terjadi reaksi karbon, sulfur dan nitrogen dengan oksigen dan menghasilkan oksida masing masing. Dimana akan terbentuk karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) dan nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>). Hasil dari pembakaran tersebut telah

berikatan langsung terhadap masalah Kesehatan. Masalah yang terjadi diantaranya adalah penyakit kulit, saluran pernafasan bahkan otak (Munawer, 2018)

### 2. 8. 1 Emisi CO

Emisi 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.

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

### 2. 8. 2 Emisi NO<sub>2</sub>

Senyawa Nitrogen seperti Nitrogen Oksida (NO) dan Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>), yang pada umumnya dikenal dengan NO dan NO<sub>2</sub>. Emisi NO<sub>2</sub> mempunyai peran penting dalam reaksi atmosfer yang dapat membentuk partikel-partikel yang berbahaya, berpengaruh pada lapisan ozon dan hujan asam. Pengaruh gas buang Nitrogen oksida (NO) terhadap lingkungan adalah gas yang tidak berbau, tidak berwarna, tetapi beracun yang dihasilkan dari proses pembakaran. Gas

NO<sub>2</sub> dapat bergabung dengan haemoglobin dan mengganggu penyerapan oksigen dalam darah. NO<sub>2</sub> dapat menyebabkan iritasi di bagian tertentu paru-paru.

#### 2. 8. 3 Emisi SO<sub>2</sub>

Merupakan fakta yang tak dapat dipungkiri bahwa SO<sub>2</sub> merupakan penyebab terjadinya hujan asam. 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.

Pengaruh gas buang Sulfur Oksida (SO<sub>2</sub>) terhadap lingkungan adalah gas yang bersifat korosif dan beracun. Gas SO<sub>2</sub> menyebabkan iritasi membran lendir pada daerah pernapasan serta menyebabkan penyakit pernapasan kronis khususnya bronkitis.

#### 2. 8. 4 Emisi CO<sub>2</sub>

Proses karbon dioksida yang terjadi secara alami maupun yang berakibat dari tindakan manusia. Dengan demikian CO<sub>2</sub> dapat terbentuk melalui proses pembakaran yang dilakukan oleh manusia dengan bahan bakar yang digunakan. Emisi CO<sub>2</sub> pada pembakaran biomassa lebih kecil dibandingkan dengan batu bara.

Kadar karbon dioksida yang telah menyebar di atmosfer sudah mencapai tingkat yang sulit untuk diserap secara alami. Dengan

demiikian diperlukan penanganan pengurangan kadar CO<sub>2</sub> pada proses pembakaran dengan memperhatikan proses pembakaran hingga bahan bakar yang digunakan. Limbah biomassa yang dibiarkan pada alam akan menghasilkan gas metana yang lebih memberikan dampak efek rumah kaca disbanding dengan CO<sub>2</sub>.

### **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 tandan kosong 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 Pengujian Batu bara Badan Pusat Penelitian dan Pengembangan TEKMIIRA.
3. Proses pembuatan alat dilakukan di Bengkel professional CV. ALSINTAN (Alat Mesin dan Pertanian) MUARA di Jalan Jendral Sudirman No.78 Metro Barat, Kota Metro Prov. Lampung.

4. Proses pengujian hasil emisi dilakukan di Laboratorium Baristand Industri Bandar Lampung (Jl. Soekarno Hatta KM.1, Rajabasa, Rajabasa Raya, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142).

### 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 sebagaiberikut :

### 3.2.1 Alat

Berikut merupakan alat yang digunakan selama proses penelitian:

#### 1. *Gas analyzer*

*Gas analyzer* digunakan untuk mengukur kadar emisi yang dihasilkan pada proses pembakaran co-combustion dan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 *Gas Analyzer*

## 2. Timbangan Digital

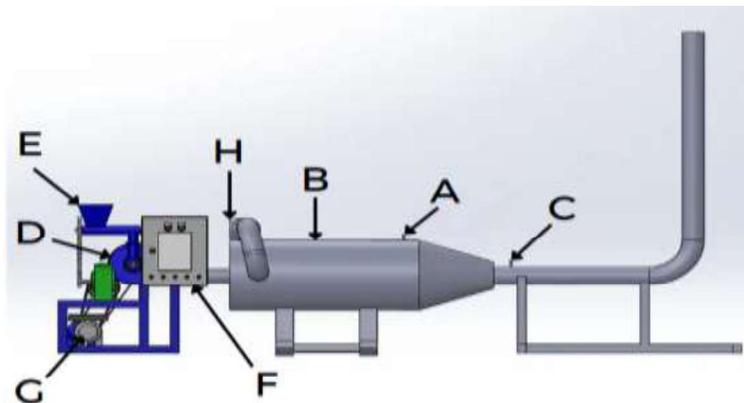
Timbangan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan timbangan digital berkapasitas maksimal 7 kg dan ketelitian 1 gram. Timbangan yang digunakan dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 3. 2 Timbangan

## 3. *Pulverized burner*

Alat *pulverized burner* merupakan mesin *coal-combustion* skala lab yang digunakan untuk membakar sampel uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 skema alat uji berikut.



Gambar 3. 3 Skema alat *coal-combustion 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 primer

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 lubang udara sekunder juga digunakan untuk memasukan pemantik api gas LPG yang berfungsi sebagai pemanasan awal burner.

4. 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 *channel* temperatur yang dihubungkan ke termokopel type K pada *pulverized burner*. Perekam temperatur yang digunakan untuk melihat dan merekam kenaikan temperatur yang terjadi di ruang pembakaran *pulverized burner* dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3. 4 *Temperature recorder* BTM-4208SD

### 3.2.2 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

Bahan	Analisis Ultimat (%)						Analisis Proksimat (%)			Nilai Kalor (Kcal/kg)
	N	C	H	O	S	MC	VM	FC	ASH	
Batu Bara Sub-bituminus B	0,91	60,74	6,17	27,33	0,52	15	40,64	39,41	4,34	5.820
TKKS Torefaksi	1,58	52,78	5,89	39,79	-	6	65,77	20,9	7	5.035

1. Batu bara serbuk sub-bituminus B



Gambar 3. 5 Batu bara serbuk sub-bituminus B

2. Tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi



Gambar 3. 6 Tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi

### 3.3 *Metode Pengambilan Data*

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

#### 3.4.1 *Prosedur Persiapan Sampel Uji*

Persiapan sampel uji dilakukan di hangar Teknik Mesin Universitas Lampung. Pada penelitian ini sampel uji tandan kosong 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 tandan kosong kelapa sawit pada temperatur 275 °C lalu dilakukan penggilingan dengan *ball mill*.
2. Mengayak hasil torefaksi TKKS dengan ayakan mesh 100.
3. Mengayak batu bara yang akan digunakan dengan ayakan mesh 100.
4. Melakukan pencampuran bahan batu bara dan TKKS tertorefaksi dengan komposisi 80% batu bara dan 20% TKKS tertorefaksi
5. Melakukan pemisahan sampel untuk pengujian dengan variasi pengujian AFR pada udara stoikiometri, *excess air* 10%, *excess air* 20% dan *excess air* 30%.

#### 3.4.2 *Pengujian Co-firing*

Dalam pengujian cofiring menggunakan dua buah blower yaitu blower primer dan sekunder. Berdasarkan perhitungan teoritis diperoleh kebutuhan udara pada alat dinyatakan sebagai berikut:

Tabel 3.3 Kebutuhan udara pembakaran

Bahan Bakar	Kebutuhan o <sub>2</sub> (kg udara/kg bahan bakar)	AFR Stoikiometrik (kg udara/kg BB)	Excess Air	AFR Actual	Actual Air Required (KG udara/jam)	Flow Rate (M <sup>3</sup> udara/jam)
Batu bara 100%	2,885	12,4364	0	12,436	310,908	259,090
			10%	13,679	341,999	284,999
			20%	14,923	373,090	310,90
			30%	16,167	404,181	336,817
Cofiring (Batu bara 80% dan TKKS 20%)	2,811	12,1164	0	12,116	302,909	252,424
			10%	13,328	333,200	277,667
			20%	14,539	363,491	302,909
			30%	15,751	393,782	328,151

Dalam menentukan laju massa udara primer dan sekunder dari blower dapat diketahui dengan menggunakan persamaan dengan nilai didapat dari hasil pengukuran dengan alat ukur anemometer sehingga didapat hasil:

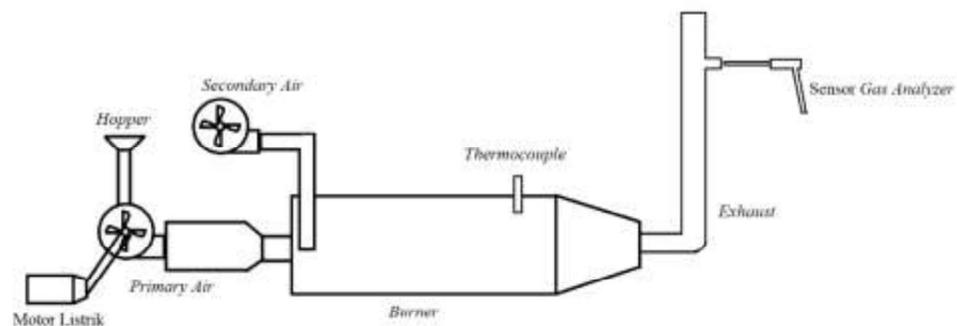
Tabel 3,4 Kebutuhan udara primer dan sekunder

Bahan Bakar	Excess Air	Flow rate (M <sup>3</sup> udara/jam)	Volume Flow Rate (m <sup>3</sup> /jam)		Vair (m/s)	
			Primer	Sekunder	Primer	Sekunder
Batu bara 100%	0%	259,091	95	164,091	7,270	12,557
	10%	284,999		190,000		14,540
	20%	310,908		215,909		16,523
	30%	336,817		241,818		18,505
Cofiring (Batu bara 80% dan TKKS 20%)	0%	252,424	95	157,425	7,270	12,047
	10%	277,667		182,667		13,979
	20%	302,909		207,909		15,911
	30%	328,151		233,152		17,842

### 3.4.3 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 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 mengaturnya pada kecepatan angin yang diinginkan menggunakan inverter pada panel instrumen (perubahan kecepatan *blower* dilakukan dengan merubah frekuensi *blower* yang telah disesuaikan dengan anemometer).
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*.

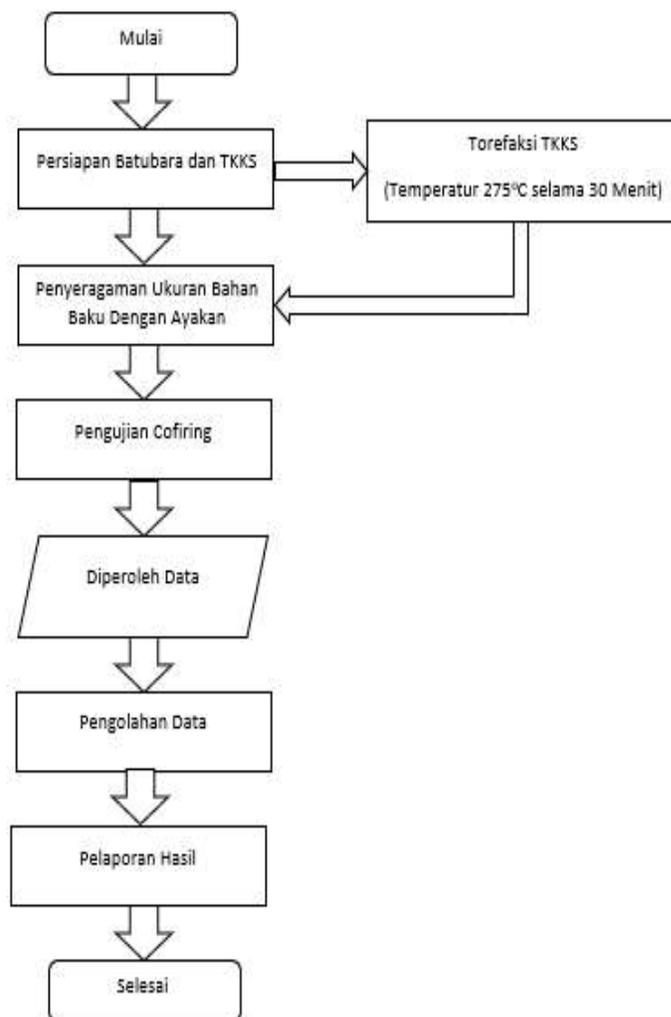


8. Jika bahan bakar serbuk batu bara sudah terbakar habis, menekan sekali tombol logger dan kemudian menekan tahan tombol rec pada *temperature recorder*.

9. Mengulangi prosedur (4) sampai (8) menggunakan sampel uji pada bahan bakar serta variasi AFR yang berbeda.
10. Mengolah seluruh data yang terkumpul.

### 3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian pengaruh variasi ukuran partikel batu bara sub bituminous terhadap profil temperatur pembakaran ditunjukkan pada Gambar 3. 8 berikut.



Gambar 3. 8 *Flowchart* alur penelitian

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian pengujian karakteristik emisi pembakaran tandan kosong kelapa sawit dengan *co-firing* batu bara dengan variasi AFR adalah sebagai berikut:

1. Pembakaran batu bara pada udara stoikiometri menghasilkan nilai CO sebesar 6600 ppm, CO<sub>2</sub> sebesar 17000 ppm, SO<sub>2</sub> sebesar 468 ppm, NO<sub>2</sub> sebesar 410 ppm dengan efisiensi sebesar 72%. Dan pada *cofiring* menghasilkan nilai CO sebesar 5110 ppm, CO<sub>2</sub> sebesar 18000 ppm, SO<sub>2</sub> sebesar 398 ppm, NO<sub>2</sub> sebesar 367 ppm dan efisiensi sebesar 78%. Dengan demikian didapatkan bahwa nilai dari emisi CO berkurang 22,57%, SO<sub>2</sub> berkurang 14,95% dan NO<sub>2</sub> berkurang sebesar 10,48%.
2. Pengaruh *excess air* terhadap emisi yang dihasilkan tentunya bagus karena dapat mengurangi kadar emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Pada pembakaran batu bara 100% dan udara stoikiometri memiliki nilai SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebesar 468 ppm dan 410 ppm dan mengalami penurunan SO<sub>2</sub> 5,98% dan NO<sub>2</sub> 12,93% pada 30% excess air. Penurunan SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> pada 20% excess air adalah 3,21% dan 10,2% serta pada excess air 10% penurunan SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebesar 3,42% dan 2,68%. Pembakaran *cofiring* dan udara stoikiometri menghasilkan nilai SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebesar 398 ppm dan 367 ppm dan

mengalami penurunan SO<sub>2</sub> 25,13% dan NO<sub>2</sub> 8,99% pada 30% excess air. Pada 20% excess air penurunan SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebesar 22,61% dan 5,18% serta pada 10% excess air penurunan SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebesar 8,14% dan 15,58%.

## 5.2. Saran

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

1. Perlu dilakukan pengujian dengan pengkondisian temperatur ruang kerja
2. Melanjutkan penelitian dengan penambahan boiler untuk mengetahui kinerja boiler menggunakan bahan bakar TKKS.
3. Sebaiknya memperhatikan komponen yang digunakan karena berada pada temperatur kerja yang tinggi

## Daftar Pustaka

- Achmad Kusairi, S. (2017). Teknik Pembakaran (HMKB646) Achmad Kusairi Samlawi, MM., MT Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat 2017.
- Al-Maari, M. A., Ahmad, M. A., Din, A. T. M., Hassan, H., & Alsobaai, A. M. (2021). Co-pyrolysis of oil palm empty fruit bunch and oil palm frond with low-density polyethylene and polypropylene for bio-oil production. *Arabian Journal of Chemistry*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103282>
- Babcock, & Wilcox Company. (2015). Steam Forty-Second Edition (G. L. Tomei, Ed.).
- Badan Pusat Statistik. (2016). Proporsi Pasokan Energi Primer (Persen), 2014-2016. <https://www.bps.go.id/indicator/7/1158/1/Proporsi-Pasokan-Energi-Primer.html>.
- Badan Pusat Statistik. (2021). Produksi Tanaman Perkebunan (Ribuan Ton), 2019-2021. <https://www.bps.go.id/indicator/54/132/1/Produksi-Tanaman-Perkebunan.html>.
- Bruce G. Miller and Tillman, D. A. (2008). *Combustion Engineering Issues for Solid Fuels* (B. G. M. D. A. Tillman, Ed.). Elsevier Ltd. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results> <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373611-6.X0001-8>
- Cengel, A, Yunus, Boles, A, Michael. 2010. Thermodynamics an Engineering Approach, Third Edition, WCB/McGraw-Hill, United States of America, 1989.

Djayanyi, dkk. (2011). Pengendalian Emisi Gas Buang Boiler Batu bara Dengan Sistem Absorpsi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 9.

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., Puspipitek, K., & -Tangerang Selatan, S. (2020). Simposium Nasional RAPI XIX Tahun 2020 FT UMS PREDIKSI AWAL KOMPOSISI BLENDING BATU BARA DAN EFB UNTUK MEMINIMALISASI POTENSI SLAGGING FOULING PADA CO-FIRING PLTU DENGAN PC-BOILER.

Koppejan, J. (2016). *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing* Edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan. January.

Munawer, M. E. (2018). Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes. *Journal of Sustainable Mining* (Vol. 17, Issue 2, pp. 87–96). Central Mining Institute in Katowice.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.12.007>

Nursatria A. (2015). *Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Carrying Air Blower Terhadap Laju Pembakaran Bahan Bakar Batubara*. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya

Pranoto, B. (2012). *Pengaruh Variasi Air Fuel Ratio (AFR) Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Premixed Minyak Kapuk Pada Burner Seminar Hasil Konsentrasi Konversi Energi*.

Sutarto, H., Gusti Nurrohim, T., Xaverio Ilyas, A., & Suyitno, S. (2020). *Pembakaran Bersama Biomassa dan Batu Bara: Pengaruh Rasio Biomassa-*

Batu Bara dan Excess Air. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 19(1).  
<https://doi.org/10.20961/mekanika.v19i1.40039>

Shahzad, M. Saleem, M. Ghauri, J. Akhtar, N. Ali & N.A. Akhtar (2014):  
Emissions of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and CO from Co-Combustion of Wheat Straw and  
Coal under Fast Fluidized Bed Condition, *Combustion Science and  
Technology*, DOI:10.1080/00102202.2014.1002561

Thaim, T., Rasid, R. A., & Ismail, W. M. S. W. (2019). Torrefaction Of Oil Palm  
Fronds (Opf) As A Potential Feedstock For Energy Production Processes.  
*Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 27(2),  
64–71. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2019.9315>

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>

Wang, X., Rahman, Z. U., Lv, Z., Zhu, Y., Ruan, R., Deng, S., Zhang, L., & Tan,  
H. (2021). Experimental study and design of biomass co-firing in a full-  
scale coal-fired furnace with storage pulverizing system. *Agronomy*, 11(4).  
<https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040810>

Xue, Z., Zhong, Z., & Lai, X. (2020). 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>