

**PENGARUH RASIO KOMPOSISI CO-COMBUSTION
BATUBARA DENGAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT
TERTOREFAKSI TERHADAP EMISI GAS BUANG HASIL
PEMBAKARAN**

(Skripsi)

Oleh:

ALMER ELIAN FARRELL

NPM 1955021003



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

**PENGARUH RASIO KOMPOSISI CO-COMBUSTION BATUBARA
DENGAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERTOREFAKSI
TERHADAP EMISI GAS BUANG HASIL PEMBAKARAN**

Abstrak

Energi adalah suatu kebutuhan utama terutama pada sektor rumah tangga, transportasi, dan industri yang semakin meluas. Kebutuhan energi masih sangat didominasi oleh sumber daya yang berasal dari fosil, baik berupa minyak bumi, batu bara, maupun gas. Pabrik kelapa sawit memiliki limbah berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang selama ini belum dimanfaatkan secara maksimal. TKKS dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar karena memiliki nilai kalor sebesar 2900 kkal/kg. *Pre-Treatment* TKKS dengan cara ditorefaksi bisa meningkatkan nilai kalor dari TKKS tersebut yang dimana setelah ditorefaksi nilai kalor TKKS setara dengan batubara Bituminous-B. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk Mengetahui konsentrasi emisi CO, SO₂, dan NO₂ pada *co-combustion* batubara dengan TKKS tertorefasi dengan variasi komposisi. Pada Penelitian ini menggunakan metode *pulverized combustion* dengan 3 variasi komposisi bahan bakar dengan perbandingan batubara : TKKS berturut turut sebesar 90:10, 80:20, 70:30. Hasil dari penelitian ini berupa konsentrasi emisi yang dihasilkan dari pembakaran, adapun komposisi yang terbaik adalah pada komposisi bahan bakar 70:30 dimana menghasilkan emisi CO, SO₂, dan NO₂ secara berturut turut sebesar 4600, 324, dan 359 ppm.

Kata kunci : TKKS, *Co-combustion*, emisi

EFFECT OF CO-COMBUSTION COMPOSITION RATIO OF COAL WITH TORREFACTED OIL PALM EMPTY BUNCHES ON EXHAUST GAS EMISSIONS FROM COMBUSTION

Abstrac

Energy is a major need, especially in the household, transportation and industrial sectors, which are increasingly expanding. Energy needs are still dominated by resources originating from fossils, whether in the form of petroleum, coal or gas. Palm oil factories have waste in the form of empty palm fruit bunches (EPFB) which have not been utilized optimally. EPFB can be used as fuel because it has a calorific value of 2900 kcal/kg. Pre-Treatment of EPFB by torrefaction can increase the calorific value of the TKKS, where after orrefaction the calorific value of EPFB is equivalent to Bituminous-B coal. This research aims to determine the concentration of CO, SO₂ and NO₂ emissions in co-combustin coal with torrefied EPFB with variations in composition. This research uses the pulverized combustion method with 3 variations in fuel composition with a ratio of coal: EPFB of 90:10, 80:20, 70:30 respectively. The results of this research are the concentration of emissions resulting from combustion, the best composition is the 70:30 fuel composition which produces CO, SO₂ and NO₂ emissions of 4600, 324 and 359 ppm respectively.

Keyword : TKKS, Co-combustio, emission

**PENGARUH RASIO KOMPOSISI CO-COMBUSTION
BATUBARA DENGAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT
TERTOREFAKSI TERHADAP EMISI GAS BUANG HASIL
PEMBAKARAN**

Oleh:

ALMER ELIAN FARRELL

NPM 1955021003

skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



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

Judul

: Pengaruh Rasio Komposisi Co-Combustion Batubara

Dengan Tandan Kosong Kelapa Sawit Tertorefaksi

Terhadap Emisi Gas Buang Hasil Pembakaran

Nama

: Almer Elian Farrell

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1955021003

Jurusan

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

Komisi Pembimbing I

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

NIP 197103311999031003

Komisi pembimbing 2

Hadi Prayitno, S.T., M.T.

NIP 198805142019031012

Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

NIP 197108171998021003

Kepala Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Ir. Martinus, S.T., M.sc.

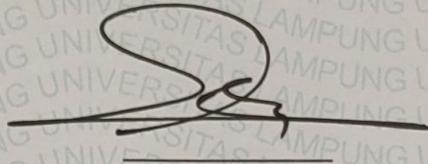
NIP 197908212003121003



MENGESAHKAN

1. Tim Pengaji

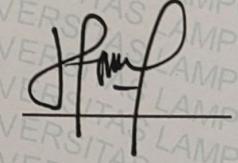
Ketua Pengaji : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**



Anggota Pengaji : **Hadi Prayitno, S.T., M.T.**



Pengaji 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 : 26 Maret 2024

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

DENGAN INI SAYA MENYATAKAN BAHWA SKRIPSIINI 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, 22 Juli 2024

Penulis,



ALMER ELIAN FARRELL

NPM 1955021003

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Klaten, Provinsi Jawa Tengah pada tanggal 12 September 2001 sebagai anak pertama , dari pasangan Bapak Arif Nugroho dan Ibu Disa Arnolina Maharami. Penulis menempuh Pendidikan pertama kali di TK AISIYAH METRO dan melanjutkan sekolah dasar di SD MUHAMMADIYAH KOTA METRO hingga tahun 2013, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 3 KOTA METRO yang diselesaikan tahun 2016 dan SMA NEGERI 5 KOTA METRO yang diselesaikan tahun 2019, hingga pada tahun 2019 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota bidang minat dan bakat pada periode 2020-2021 dan periode 2021-2022. Selain aktif dalam HIMATEM, Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di **PT. PGN LNG Tbk.** Stasiun Labuhan Maringgai, Labuhan Maringgai, Lampung Timur tahun 2022 dengan judul laporan “**ANALISIS KONSUMSI BAHAN BAKAR GAS ENGINE GENERATOR CATERPILLAR G3406 DI PT PGN LNG INDONESIA**”. Tahun 2023 penulis melakukan penelitian yang tergabung dalam tim Co-firing dengan judul Penelitian “**PENGARUH RASIO**

**KOMPOSISI CO-COMBUSTION BATUBARA DENGAN TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT TERTOREFAKSI TERHADAP EMISI GAS BUANG
HASIL PEMBAKARAN” dibawah bimbingan Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Hadi
Prayitno, S.T., M.T.**

MOTTO

Anda mungkin bisa menunda, tapi waktu tidak akan menunggu.

~ Benjamin Franklin ~

Menuju tak terbatas dan melampaunya.

~ Buzz Lightyear~

Jika Anda tidak berhasil hari ini, jangan khawatir. Masih ada cara lain untuk jadi bermanfaat

~ Sova ~

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT. atas berkat rahmat, hidayah serta karunia-Nya dan tak lupa pula sholawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi besar Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini yang berjudul, “Pengaruh Rasio Komposisi Co-Combustion Batubara Dengan Tandan Kosong Kelapa Sawit Tertorefaksi Terhadap Emisi Gas Buang Hasil Pembakaran” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana di Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penyelesaian Skripsi ini tentu tidaklah lepas dari bantuan, bimbingan, dukungan serta semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan Terima kasih kepada:

1. Kedua Orang Tua penulis yang selalu menyemangati dan memberikan dukungan serta do'a yang tak terbatas.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.sc., sebagai Ketua Program Studi Sarjana Teknik Mesin Universitas Lampung.

5. Dr. Amrul, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing I penulis yang telah memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.
6. Hadi Prayitno, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing II penulis yang telah memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.
7. Dr. Harmen, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembahas yang telah memberikan penulis saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.
8. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Sarjana Teknik Mesin atas segala ilmu yang bermanfaat, waktu dan tenaga yang diberikan untuk penulis.
9. Fika Faradilla selaku orang yang selalu memberikan dukungan di masa senang dan susah terutama dalam penyelesaian tugas akhir ini.
10. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan 2019 yang telah memberikan bantuan dan dukungannya kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini belum sempurna dan masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata, Penulis berharap semoga laporan skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Amin.

Bandar Lampung, januari 2024

Penulis,

Almer Elian Farrell

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB I	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan	5
1.3 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II.....	8
2.1 Batu Bara.....	8
2.2 Kandungan Batu Bara.....	10
2.3 Biomassa.....	12
2.4 Potensi Tandan Kosong Kelapa Sawit	14
2.5 Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	16
2.5.1 Sifat Hidrofobik TKKS	19
2.6 Pembakaran	20
2.6.1 Pulverized Combustion	22
2.7 Efisiensi Pembakaran	23
2.8 Air Fuel Ratio	24
2.9 Co-firing	24
2.10 Emisi.....	27
BAB III.....	31
3.1 Skema Penelitian	31
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	32
3.2.1 Tempat Penelitian	32

3.2.2 Waktu Penelitian	32
3.3 Alat dan bahan.....	33
3.3.1 Alat	33
3.3.2 Bahan.....	38
3.4 Metode Pengambilan Data	39
3.5 Diagram alir Penelitian	41
BAB IV	42
4.1 Sifat batubara sub-Bituminous B dan TKKS tertorefaksi	42
4.2 Efisiensi Pembakaran	44
4.3 Pengaruh Penambahan TKKS pada emisi CO	46
4.4 Pengaruh Penambahan TKKS terhadap emisi CO ₂	47
4.5 Pengaruh Penambahan TKKS terhadap emisi SO ₂	49
4.5 Pengaruh Penambahan TKKS terhadap emisi NO ₂	51
BAB V.....	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
Daftar Pustaka	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sumber daya dan cadangan Batubara Indonesia	9
Gambar 2.2 Rantai konversi biomassa	14
Gambar 2.3. Limbah yang dihasilkan dari pengolahan 1 Ton kelapa sawit.....	16
Gambar 2.4 Grafik kandungan lignoselulosa pada TKKS	18
Gambar 2.5. Grafik analisis ultimat TKKS	18
Gambar 2.6. Grafik analisis proksimat TKKS	19
Gambar 2.7. Grafik Hidrofobik TKKS.....	20
Gambar 2.8. Skema alat uji sistem pembakaran serbuk.....	24
Gambar 2.9. Pengaruh temperatur terhadap emisi NOx.....	29
Gambar 3.1. Timbangan Digital.....	33
Gambar 3.2. Ayakan 200 mesh	34
Gambar 3.3. Alat Uji Emisi	35
Gambar 3.4. Thermo Recorder.....	36
Gambar 3.5. Pulverized Burner	36
Gambar 3.6. Batu bara serbuk sub-bituminous	38
Gambar 3.7. TKKS tertorefaksi.....	38
Gambar 3.8. Skema Pengujian	39
Gambar 3.9. Diagram Alir Penelitian.....	41
Gambar 4.1. Efisiensi pembakaran co-firing.....	44
Gambar 4.2. Grafik Emisi CO	46
Gambar 4.3. Konsentrasi CO ₂	48
Gambar 4.4. Grafik Emisi SO ₂	50
Gambar 4.4. Grafik Emisi NO ₂	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1Kandungan Pada Batubara	12
Tabel 4.1. Hasil Uji Kandungan Batubara subBituminous B dan TKKS	42

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era kontemporer, energi semakin menjadi aspek fundamental dan signifikan bagi masyarakat untuk memenuhi kebutuhan di berbagai sektor seperti rumah tangga, transportasi, juga industri dengan perkembangan yang pesat. Saat ini permintaan terhadap energi sebagian besar didominasi oleh bahan bakar fosil, seperti minyak bumi, batu bara, dan gas. Mengingat energi fosil merupakan sumber daya yang tidak terbarukan, maka pasokannya pada akhirnya akan habis jika dikonsumsi terus-menerus.

Batubara memegang peranan utama sebagai penyumbang pasokan energi yang signifikan terlebih lagi di sektor industri. Pembangkit listrik tenaga batu bara saat ini menyumbang 41% dari pembangkitan energi dan diproyeksikan meningkat menjadi 44% pada tahun 2030 (Zaenal dkk., 2021). Pemanfaatan batubara sebagai sumber energi mempunyai tantangan tersendiri karena kontribusinya terhadap peningkatan gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO₂), dimana unsur ini merupakan faktor penyebab dari perubahan iklim dan pemanasan global. Pada era kini, permintaan terhadap sumber energi alternatif yang ramah lingkungan menjadi perhatian utama yang mana menggambarkan energi biomassa sebagai energi potensial. Karbon netral yang diperoleh dari fitur biomassa sangat ramah

lingkungan ketika dilakukan pembakaran dikarenakan emisi CO₂ yang dikeluarkan berasal dari hasil fotosintesis tanaman.

Indonesia sebagai negara agraris memiliki sumber daya biomassa yang sangat besar sehingga sangat menjanjikan dalam bidang energi biomassa. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi memberikan banyak manfaat, salah satunya adalah sifat terbarukannya, sehingga menjadikannya pilihan energi berkelanjutan. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi menghadirkan tantangan karena melimpahnya pasokan biomassa dan suplai energi tersebut yang menyebar luas. Oleh karena itu, kebutuhan untuk mengumpulkan biomassa menjadi sangat penting dimana juga mengakibatkan biaya operasional meningkat.

Pabrik kelapa sawit mempunyai kemampuan menghasilkan limbah biomassa karena sampah yang dihasilkan dikumpulkan secara sistematis. Perusahaan kelapa sawit menghasilkan sampah berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan belum terpakai maupun dimanfaatkan dengan optimal. Selama ini tandan kosong kelapa sawit hanya dimanfaatkan sebagai bahan pengisi tanah atau kadang-kadang dijadikan kompos. Sisa tandan kelapa sawit yang kosong dibiarkan menumpuk. Kegagalan dalam mengatasi tumpukan sampah ini akan menimbulkan permasalahan sampah yang disebabkan oleh adanya tandan kosong kelapa sawit yang belum diolah. TKKS merupakan pilihan bahan bakar yang layak karena nilai kalorinya yang tinggi yaitu 2900 kal/gram. TKKS mempunyai kandungan air yang sangat tinggi, berkisar antara 60-65%. Hal tersebut juga mengandung sejumlah besar potassium (K), mencapai hingga 2,4%. Ditambah lagi, TKKS diidentifikasi memiliki kandungan klorin (Cl). Laju korosi tentu juga mengalami peningkatan

seiring nilai kandungan klorida mengalami peningkatan, juga keberadaan kalium yang berkontribusi terhadap terciptanya endapan pada superheater sehingga menghambat tahapan dalam memindahkan panas yang berada dalam tungku.

Untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan nilai kalori yang sama dengan batubara, penting untuk melakukan pengolahan awal pada biomassa untuk meningkatkan nilai kalori dan menurunkan kandungan airnya. Proses torefaksi merupakan opsi potensial untuk metode pre-treatment yang dinilai dapat membuat hasil bahan bakar padat memiliki kandungan kalori tinggi. Torrefaksi merupakan perlakuan termal yang terjadi pada suhu yang relatif rendah, khususnya pada kisaran 200-300 °C.

Studi torefaksi lebih lanjut pada campuran sampah perkotaan menunjukkan hasil yang beragam, menunjukkan nilai kalor yang tinggi sebanding dengan batubara sub-bituminous B, berkisar antara 5200 hingga 5800 kkal/kg. Proses torefaksi diterapkan pada biomassa sampah kota dalam reaktor tabung kontinu pada suhu 275 °C dan lama tinggal 30 menit. Proses ini menghasilkan nilai kalor yang sangat tinggi yaitu 5425 kkal/kg. Nilai kalor briket tandan buah kosong sawit (TKKS) sebesar 5914,81 kkal/kg.

Pendekatan yang efektif untuk memitigasi penggunaan bahan bakar fosil dan menekan peningkatan emisi gas rumah kaca adalah dengan menggunakan biomassa, yaitu TKKS, sebagai sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk pelestarian ekosistem lingkungan. Dengan demikian, pembakaran bersama (co-combustion) antara batubara dengan TKKS tertorefaksi

dapat menyelesaikan permasalah pengurangan penggunaan batu bara dan pemanfaatan limbah TKKS.

Untuk mengurangi penggunaan batubara dan pemanfaatan energi biomassa dapat dilakukan dengan pembakaran bersama (co-combustion). Co-combustion adalah proses penghasilan energi yang dilakukan secara pembakaran bersama dengan mengkombinasikan batubara dan biomassa sebagai sumber energinya. Secara umum pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif sangat berperan positif dalam hal pengurangan limbah biomassa dan mengurangi penggunaan batubara sebagai bahan bakar utama. Penggunaan biomassa seperti halnya TKKS mentah telah banyak dilakukan dalam pengkajian dan memberikan pengaruh yang kurang efektif, sehingga dalam penelitian kali ini jenis TKKS yang digunakan adalah TKKS yang sudah dalam kondisi ter torefaksi.

Penelitian lain yan relevan tehadap topik co-combustion biomassa TKKS tidak memberikan cukup kontribusi dari segi informasi terkait kandungan emisi yang dihasilkan. Padahal co-combustion terbukti bisa menekan pengeluaran SOx dikarenakan tingkatan kandungan S dan N nya rendah pada biomassa dengan suhu tinggi, sehingga penggunaan TKKS ter torefaksi ini diyakini mampu meningkatkan sifat sifat pembakaran dan mengurangi konsentrasi emisi seperti CO, NOx, dan SOx yang dihasilkan..

1.2 Tujuan

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

1. Mengetahui pengaruh *co-combustion* batubara dengan biomassa ter-torefaksi Terhadap emisi CO₂, NO₂, dan SO₂.
2. Mengetahui kondisi terbaik dari *co-combustion* berdasarkan komposisi yang dipilih.

1.3 Batasan masalah

Kajian pada penelitian ini memfokuskan terhadap proses co-combustion batubara dan biomassa TKKS Tertorefaksi. Beberapa batasan pada kajian ini sebagai berikut:

1. Menggunakan bahan baku TKKS ter-torefaksi.
2. Jenis batu bara yang digunakan adalah batubara bituminous B
3. *Co-combustion* menggunakan sistem *pulverized combustion*

1.4 Sistematika Penulisan

Penjelasan dibawah ini memuat sistematika penulisan dari masing-masing sub-bahasan yang terdiri dari:

BAB I: PENDAHULUAN

Memuat uraian fenomena terkait yang melatarbelakangi konteks permasalahan, tujuan, limitasi dan prosedural pelaksanaan dan penyusunan penelitian.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini terdiri dari sejumlah teori yang memiliki relevansi terhadap topik penelitian.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini mencakup aspek-aspek yang berkaitan dengan pelaksanaan penelitian, khususnya lokasi penelitian, perlengkapan penelitian, peralatan, dan protokol pengujian

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHSAN

Bab ini menyajikan temuan juga analisis pembahasan berdasarkan data yang dikumpulkan pada pelaksanaan penelitian.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyajikan temuan dan rekomendasi yang diperoleh dari penelitian ini..

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini memuat kutipan dan sumber literatur yang digunakan penulis untuk menyelesaikan penulisan penelitian.

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

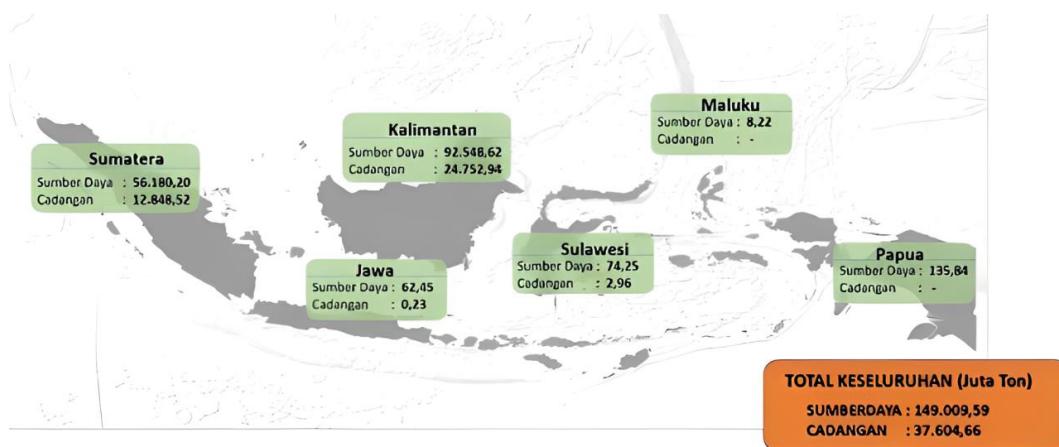
2.1 Batu Bara

Batu bara adalah sebuah batuan sedimen yang berasal dari bahan organik mengandung sejumlah karbon diantaranya adalah nitrogen, oksigen, hidrogen, dan belerang serta sejumlah kecil elemen termasuk materi mineral penyusun lainnya. Nama batu bara diperkirakan berasal dari bahasa Inggris Kuno, yaitu col jenis arang yang digunakan saat itu. Beberapa daerah menyebut batu bara sebagai batu bara laut, karena batu bara ini terkadang ditemukan di pinggir pantai terutama di Timur Laut Inggris. Selama awal abad pertengahan (sebelum 1000 M), batu bara belum mulai diambil dan ditambang tetapi setelah itu ada catatan tertulis tentang keberadaan batu bara ditambang. Secara keseluruhan abad ke-19 dan awal abad ke-20 penggunaan batu bara mulai berkembang pesat.

Batu bara juga dapat diartikan sebagai sebuah batuan padat, mudah terbakar, rapuh, dan memiliki nilai karbon. Batu bara terbentuk melalui proses perubahan vegetasi alami dan dekomposisi bahan organik yang melalui proses pemadatan, temperatur, dan tekanan. Batu bara memiliki warna yang bervariasi dan cenderung coklat kehitaman, warna ini tergantung dari tingkat batu bara tersebut. Lumut, tumbuhan rendah, dan tumbuhan berkayu merupakan sumber vegetasi pembentuk

utama batu bara. Batu bara terbentuk dari tumbuhan prasejarah yang tumbuh di ekosistem rawa-rawa. Ketika tanaman tersebut mati, biomassa mereka diendapkan secara anaerobik, lingkungan akuatik yang miliki kadar oksigen rendah dapat mencegah pembusukan dan pelepasan karbon dioksida (Speight, 2005)

Peluang batubara Indonesia yang paling besar terletak di Pulau Sumatera dan Pulau Kalimantan. Selain itu, Jawa, Sulawesi, Maluku, dan Papua juga memiliki potensi tersebut. Potensi batubara nasional berdasarkan jenis dan aksesibilitasnya meliputi sumber daya sebesar 149.009,59 juta ton, cadangan sebesar 37.604,66 juta ton, dan sumber daya pertambangan dalam (kedalaman 100-500 meter) sebesar 43.250,11 juta ton. Sumatera Selatan, Kalimantan Timur, Kalimantan Utara, dan Kalimantan Selatan merupakan wilayah yang terdapat tambang dalam. Tambang ini mempunyai total sumber daya sebesar 43.250,11 juta ton. Perkiraan cadangan di Sumatera sebesar 22.174,51 juta ton, sedangkan di Kalimantan sebesar 21.075,60 juta ton. Pada Gambar 2.1 ditampilkan sumber daya dan cadangan batu bara di Indonesia.



Gambar 2.1 Sumber daya dan cadangan batubara Indonesia (PSDMBP, 2019)

Berdasarkan kualitasnya, batu bara diklasifikasikan menjadi empat berdasarkan ASTM D388 dengan kriteria pada analisis proksimat dan nilai kalor juga analisis ultimatum beserta besaran angka sulfurnya (Mahreni dkk., 2019).

1. Lignit

Lignit sering juga disebut batu bara coklat. Lignit memiliki nilai kalor dibawah 8.300 Btu/lb dengan kadar karbon berkisar 60 hingga 70%.

2. Sub bituminous

Batu bara sub bituminous merupakan jenis batu bara yang sering digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap. Batu bara sub bituminous dibagi menjadi tiga yaitu sub bituminous A, sub bituminous B, dan sub bituminous C dengan nilai kalor 8300 hingga 13000 Btu/lb dan kadar karbon berkisar 71 hingga 77% .

3. Bituminous

Batu bara bituminous dibagi menjadi batu bara bituminous volatil rendah, bituminous volatil sedang dan bituminous volatil tinggi. Batu bara bituminous nilai kalor yang lebih tinggi dari batu bara lignit dan sub bituminous. Nilai kalor batu bara bituminous berkisar 13000 hingga 14000 Btu/lb dengan kadar karbon mencapai 77 hingga 87%.

4. Antrasit

Antrasit merupakan peringkat batu bara tertinggi dengan kadar karbon lebih dari 87%. Batu bara antrasit dibagi menjadi semi-antrasit, antrasit dan 8 meta-antrasit. Batu bara jenis memerlukan waktu pembentukan terlama dibandingkan dengan jenis batu bara lainnya.

2.2 Kandungan Batubara

Struktur penyusun batu bara secara umum yaitu karbon (C), oksigen (O), dan hidrogen (H) serta unsur lain yaitu belerang (S) dan nitrogen (N). Berikut ini adalah analisis ultimatum batu bara (Sepfitrah, 2016):

1. Kadar Air

Kadar air adalah besarnya jumlah kandungan air didalam batu bara. Hasil analisis dibagi menjadi kadar air bebas dan kadar air tetap dengan jumlah keduanya disebut kadar air total. Kandungan kadar air memberikan pengaruh terhadap total penggunaan udara primer karena bahan bakar yang diiringi oleh tingkatan kadar air tinggi memerlukan sumber udara primer yang lebih besar untuk kering.

2. Zat Volatil

Zat volatil dalam KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia) berarti mudah berubah menjadi gas atau uap. Zat volatil adalah bahan mudah menguap yang terdapat pada bahan bakar. Terdapat beberapa bahan mudah menguap pada batu bara yaitu metan, hidrokarbon, hidrogen, dan karbon monoksida. Kandungan volatil pada batu bara berkisar 20% hingga 35%

3. Karbon Tetap

Karbon tetap adalah unsur yang tersisa setelah kandungan air pada batu bara dan zat volatil dihilangkan. Nilai karbon tetap adalah nilai murni pembentuk batu bara sesungguhnya. Nilai karbon akan meningkat seiring dengan lamanya waktu pembatu baraan dan nilainya dihasilkan dari perhitungan yang dikurangi oleh jumlah kadar air, jumlah zat volatil, dan abu.

4. Abu

Abu adalah sisa zat dengan sifat tidak dapat terbakar. Kandungan di dalam abu berada disekitar angka 5% hingga 40%. Semakin tinggi kadar abu maka akan berdampak tingkat pengotor, keausan, dan korosi. Kadar abu dapat dilihat pada

Tabel 2.1.Tabel 2.1. Kandungan Unsur Pada Batubara.

Jenis Batubara	M	TM	VM	FC	Ash	TS	GCV
<i>Lignite</i>	18,96	34,78	35,86	31,46	13,77	0,91	35,86
<i>Sub-bituminous</i>	14,69	26,36	40,71	39,43	5,16	0,82	40,71
<i>Bituminous</i>	10,8	16,77	40,45	45,39	3,35	0,67	40,45

2.3 Biomasa

Jauh saat manusia belum mengetahui mereka sudah memanfaatkan biomassa untuk dijadikan sumber energi yang menggerakan aktivitas sehari-hari, seperti penggunaan kayu bakar guna menyalakan api unggul. Akan tetapi seiring perkembangan zaman, transisi penggunaan terhadap energi fosil termasuk minyak, gas alam, atau batu bara untuk produksi energi menjadi masif dan berkembang sehingga pemanfaatan biomassa telah dipinggirkan dalam masyarakat (Welle, 2009). Namun demikian, pemanfaatan energi secara besar-besaran telah mengakibatkan krisis energi bagi umat manusia. Hal ini disebabkan oleh ketergantungan yang besar terhadap bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan gas alam. Bahan bakar fosil merupakan sumber daya yang terbatas, oleh

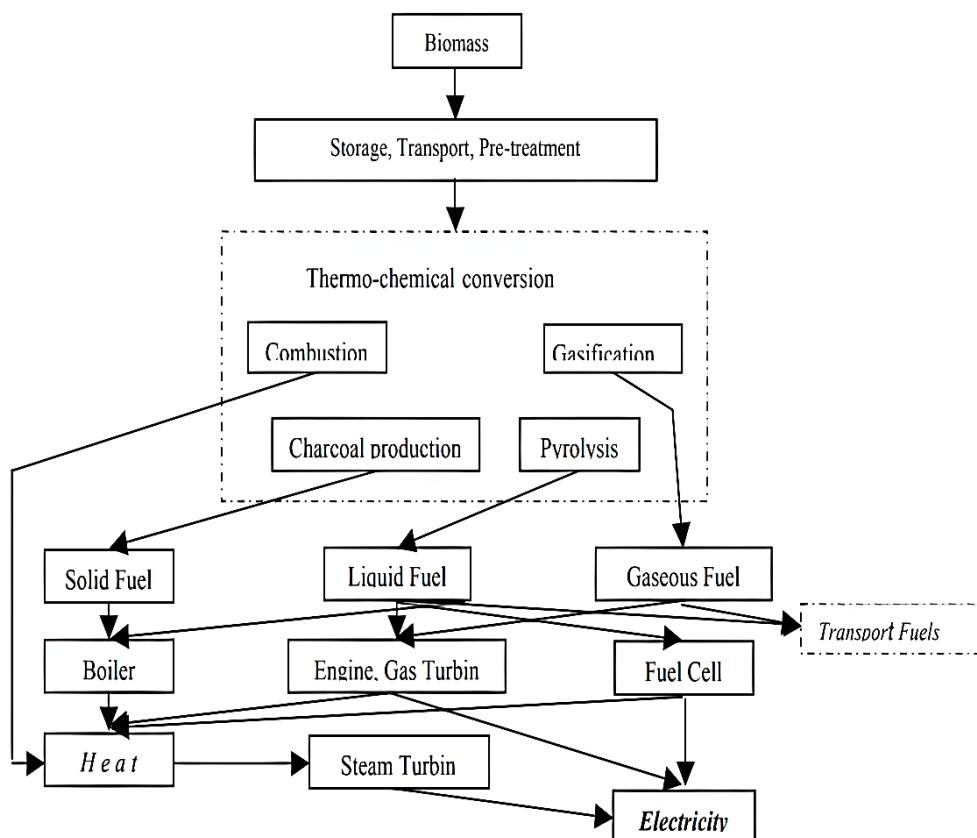
karena itu untuk mengatasi permasalahan energi yang akan datang, perlu dilakukan eksplorasi berbagai sumber energi alternatif, seperti energi biomassa.

Secara general, bahan baku biomassa dapat dikategorikan menjadi dua bentuk, yakni: pohon berkayu (woods) maupun tanaman herba (herbaceous) (Arhamsyah, 2010) untuk era kini material berkayu menyumbang sebesar 50% dari jumlah keseluruhan potensial untuk pembuatan energi biomassa, sedangkan 20% lainnya merupakan jerai yang diperoleh dari hasil sampingan petani. Batang kayu merupakan contoh aplikasi biomassa untuk energi yang pertama kali dikenal.

Di era modern sekarang, pemanfaatan kayu gelondongan untuk energi sedang bersaing dengan pemanfaatan non-energi yang lebih bernilai, seperti produksi pulp dan industri furnitur. Persaingan ini menyebabkan tingginya harga bahan baku yang digunakan dalam pengolahan biomassa menjadi senyawa turunan melalui sintesis gas (*Biomass To Liquid*). Selain itu, hal ini juga mengakibatkan peningkatan konsumsi pohon. Bahan baku kayu yang disebutkan berasal dari produksi kertas, furnitur, dan sumber sejenis.

Biomassa memerlukan pemrosesan awal untuk meningkatkan kegunaannya sebagai bahan bakar, suatu proses yang disebut konversi biomassa. Pemanfaatan teknologi konversi biomassa memerlukan penggunaan peralatan berbeda untuk mengkonversi biomassa, sehingga menghasilkan bahan bakar yang bervariasi. Biasanya, teknik untuk mengubah biomassa menjadi bahan bakar dapat dikategorikan menjadi tiga metode utama: pembakaran langsung, konversi termokimia, dan konversi biokimia. Metode yang paling mudah dan tidak rumit

adalah pembakaran langsung, karena biomassa biasanya dapat langsung dibakar (Arhamsyah, 2010). Konversi biomassa menjadi berbagai macam energi sebagaimana dijelaskan Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Rantai konversi biomassa menjadi energi panas, listrik dan bahan bakar kendaraan (Arhamsyah, 2010).

2.4 Potensi Tandan Kosong Kelapa Sawit

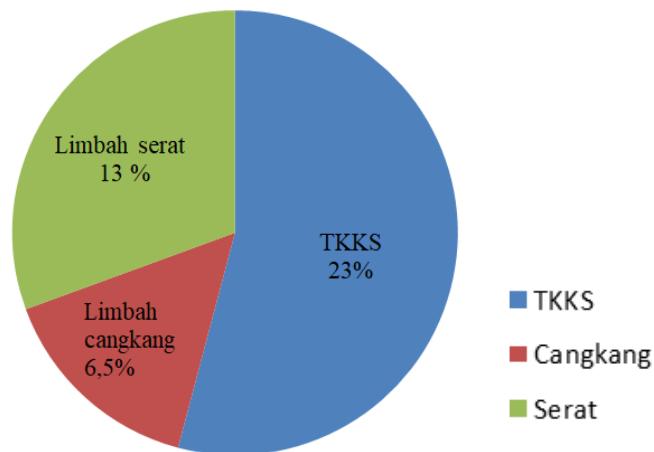
Kelapa sawit menjadi salah satu komoditas krusial bagi pertanian unggulan di Indonesia yang berperan penting dalam produksi minyak sawit mentah (CPO) dan minyak inti sawit (PKO). Minyak ini berasal dari pengolahan Tandan Buah Segar

(TBS). Minyak kelapa sawit. Pada tahun 2019, total luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 14.456.611 hektar yang mencakup beberapa status. Produksi Minyak Sawit Mentah (CPO) dan Minyak Inti Sawit (PKO) secara keseluruhan masing-masing mencapai 47.120.247 ton dan 9.424.049 ton, meliputi kepemilikan Perkebunan Besar Negara, Perkebunan Rakyat, dan Perkebunan Besar Swasta. Pada tahun 2019, Indonesia berhasil mengekspor minyak sawit sebanyak 28.279.350 ton dengan nilai ekspor sebesar 14.716.275 US\$.

Berdasarkan studi literatur, proses produksi 1 ton kelapa sawit menghasilkan 23% atau 230 kg limbah padat berupa tandan kosong sawit (EFB), 13% atau 130 kg sampah fiber, dan 6,5% atau 65 kg. dari limbah kernel atau cangkang inti. Limbah yang dihasilkan pada pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) setelah melalui proses tipper dan sterilizer mayoritas merupakan limbah tandan kosong. Proporsi sampah tandan kosong yang dihasilkan setiap metrik ton tandan buah segar (TBS) yang ditangani adalah 23%. Komposisi tandan kosong terdiri dari selulosa dengan konsentrasi berkisar antara 41,3% sampai dengan 46,5% ($C_6H_{10}O_5$)n, hemiselulosa dengan konsentrasi berkisar antara 25,3% sampai dengan 32,5%, dan lignin dengan konsentrasi berkisar antara 27,6% sampai dengan 32,5%. Materi penelitian ini menyoroti potensi energi limbah TKKS (Arifandy, dkk. 2021).

Perkebunan kelapa sawit memainkan peran penting dalam transisi negara dari energi tak terbarukan ke energi terbarukan sebagai bagian dari rencana transformasi energi nasional. Perkebunan kelapa sawit di Indonesia dianggap sebagai industri yang penting dan bertahan lama untuk energi terbarukan dan

berkelanjutan. Persentase pegolahan 1 ton kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Limbah yang dihasilkan dari pengolahan 1 Ton kelapa sawit
(Arifandy dkk., 2021).

2.5 Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit

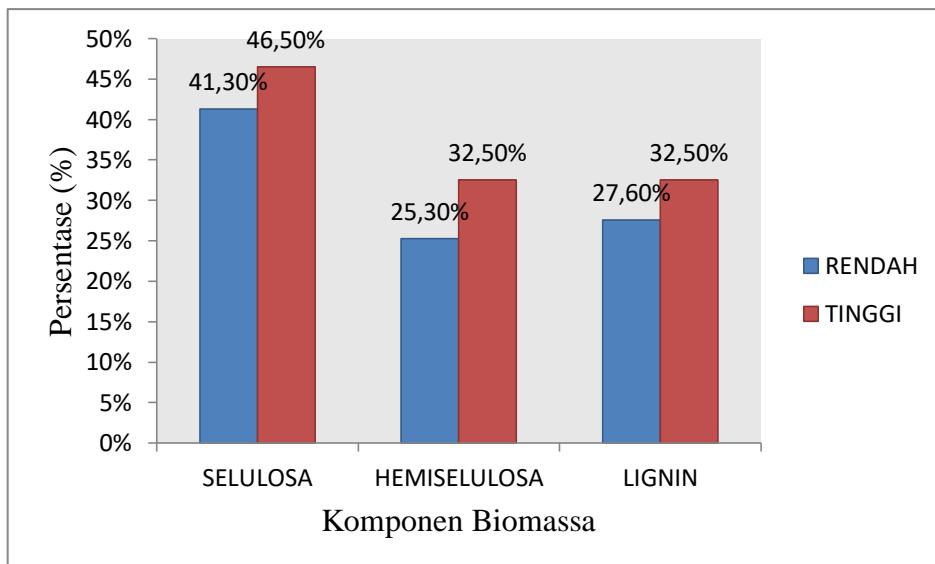
Ciri khas dari biomassa tandan buah kelapa sawit kosong setelahnya mendapatkan pre-treatment melalui analisis karakter fisik maupun bahan kimia yang terkandung pada energi tersebut. Karakteristik fisik mencakup aspek dimensi, jenis fisik biomassa, indikator proksi yaitu kadar air, abu, dan juga nilai kalor yang mana dilakukan pengukuran terhadap aspek tersebut guna melihat karakteristik biomassa tandan buah kosong. Selain itu, analisis ultimat dilaksanakan guna menemukan karakter kimia, melalui pengukuran dengan uji ultimat guna mengetahui bahan yang terkandung seperti karbon (C), Hidrogen (H), oksigen (O), Nitrogen (N), dan Sulfur (S) diukur melalui pengujian ultimat.

Bahan bakar secara general memiliki karakter fisika maupun kimia terutama pada energi dibutuhkan pengujian karakter berdasarkan indikator terkait mengingat pengaruh yang ditimbulkan dari pengaplikasian energi tersebut untuk bahan bakar. Kadar air (moisture content) biomassa tentu mempengaruhi daya tahan penyimpanan, besaran angka kalor, dan pemanasan sehingga akan mengakibatkan adanya variasi dalam desain pabrik..

Kehadiran abu dalam tungku dapat berdampak pada proses penyalakan, timbulnya polutan, dan timbulnya fouling dan slagging. Nilai kalor biomassa berdampak langsung pada jumlah energi yang dapat dihasilkan melalui pembakaran pada tumbuhan. Selain atribut fisik yang berdampak pada teknologi pembakaran, keamanan, pengeringan biomassa, dan terciptanya debu akibat aktivitas kimia dalam biomassa. Komposisi karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O) berpengaruh signifikan terhadap nilai kalor biomassa. Pada saat yang sama, keberadaan Nitrogen (N) dan Sulfur (S) dalam proses pembakaran berpengaruh signifikan terhadap produksi polutan. Secara khusus, kandungan sulfur memainkan peran penting dalam perkembangan korosi di dalam ruang bakar.

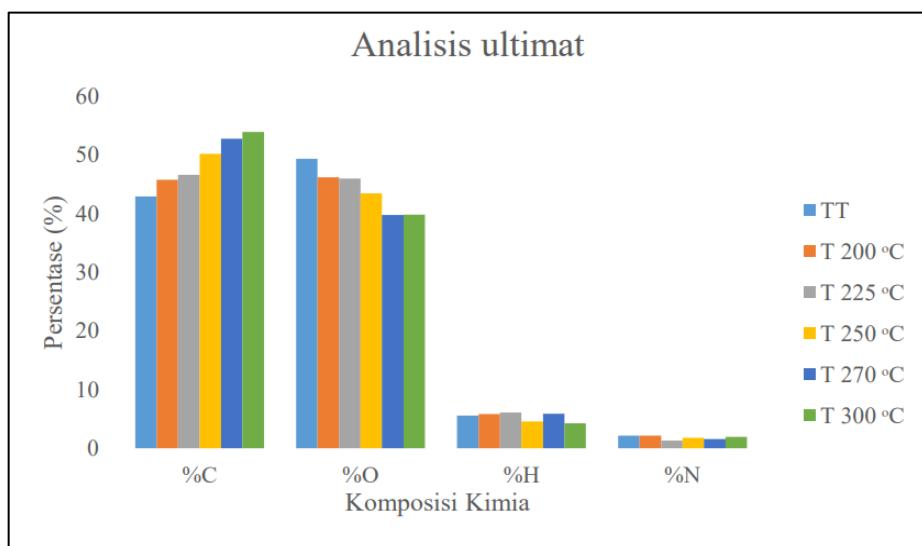
Komposisi tandan kosong berserat yang tangguh dan kuat sebagian besar terganggu karena degradasi hemiselulosa, yang mengakibatkan penurunan konsentrasi molekul selulosa. Hemiselosa dan selulosa terdegradasi seiring dengan meningkatnya temperatur *pre-treatment*. Sehingga, torefaksi menyebabkan tandan kosong menjadi rapuh dan mudah hancur. TKKS torefaksi agak halus dibandingkan dengan TKKS mentah, meskipun tidak serapuh biomassa *pre-treatment* lainnya.

Adapun beberapa kandungan yang mendukung TKKS menjadi sumber energi dapat dilihat pada Gambar 2.4.



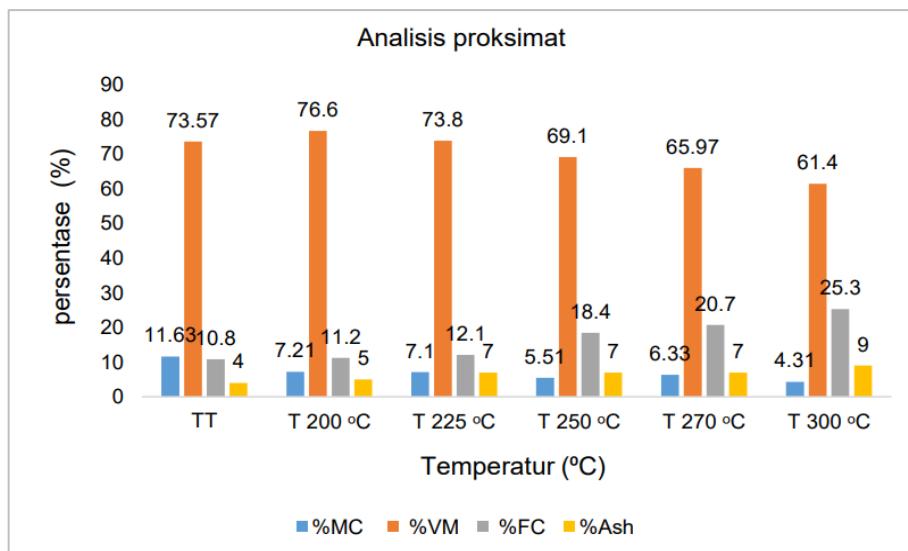
Gambar 2.4. Grafik kandungan lignoselulosa pada TKKS (Arifandy dkk., 2021).

Dari sampel TKKS mentah hingga sampel yang tertorefaksi diperoleh data analisis ultimat seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Grafik analisis ultimat TKKS.

Dari sampel TKKS mentah hingga sampel yang tertorefaksi diperoleh data analisis proksimat seperti pada Gambar 2.6.

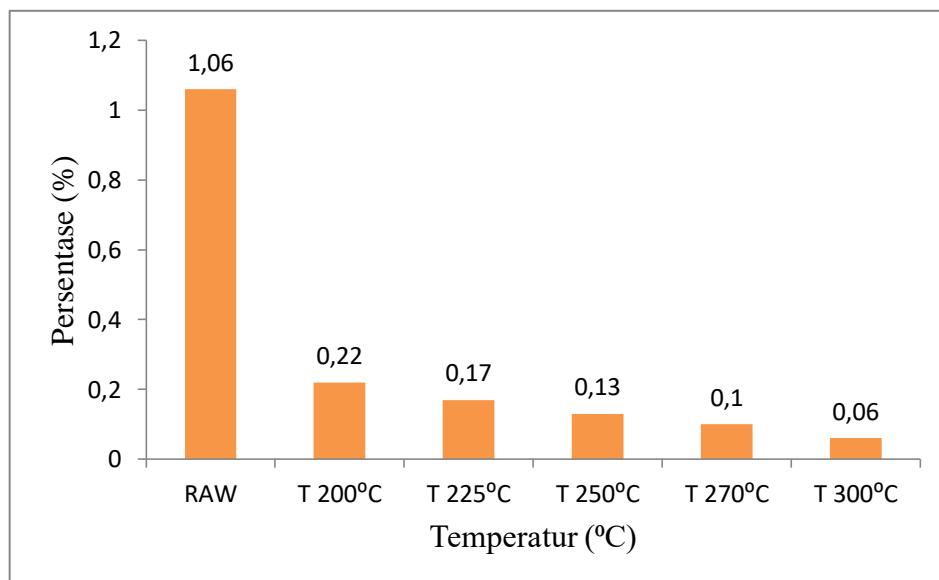


Gambar 2.6. Grafik analisis proksimat TKKS.

2.3.1 Sifat hidrofobik TKKS

Pada umumnya biomassa memiliki tingkat kadar air lebih tinggi daripada yang dimiliki oleh batu bara. Kehadiran air dalam jumlah besar akan berdampak pada penyebaran bahan akar dan penyimpanan bahan bakar. Hidrofobik merupakan kapabilitas dari bahan bakar tersebut dalam melakukan penyerapan air. Hal tersebut terjadi dikarenakan komponen selulosa, khususnya selulosa itu sendiri, bersifat hidrofobik, artinya tidak mampu menarik atau berikatan dengan air. Sifat hidrofobik menghambat dan mengurangi penyerapan air (Wahyudi dkk., 2020). Pada TKKS mentah dengan yang sudah tertorefaksi memiliki perbedaan sifat dalam penolakan air dimana pada TKKS mentah masih memiliki kemampuan

penyerapan air yang cukup tinggi sehingga TKKS mentah dapat menyerap air lebih banyak daripada TKKS yang sudah tertorefaksi. Pengujian yang telah dilakukan (Wahyudi, dkk., 2020) dengan cara merendam 2 gram sampel TKKS tertorefaksi kedalam air selama 2 jam dan dibandingkan perubahan massanya. Temperatur torefaksi sangat mempengaruhi sifat hidrofobik dari biomassa, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur torefaksi maka akan semakin tinggi kemampuan TKKS dalam penolakan terhadap air. Data hasil analisis hidrofobik pada sampel TKKS dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Grafik hidrofobik TKKS (Wahyudi dkk., 2020).

2.6 Pembakaran

Pembakaran adalah proses cepat bahan bakar mengalami oksidasi, sehingga menghasilkan panas dan, dalam kasus tertentu, cahaya. Emisi panas dan cahaya dibedakan dengan terjadinya kebakaran. Pembakaran sempurna hanya dapat

terjadi jika ada cukup banyak oksigen yang disediakan selama pembakaran untuk menjamin bahwa proses tersebut selesai sepenuhnya. Proses pembakaran dapat dipahami sebagai reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dan oksigen yang ada di udara. Produk sampingan utama dari pembakaran meliputi karbon dioksida, uap air, dan energi panas. Selain itu, proses pembakaran menghasilkan produk samping lain seperti karbon monoksida, abu, nitrogen oksida (NO_x), atau sulfur oksida (SO_x), yang bervariasi tergantung pada spesifik bahan bakar yang digunakan (Triwibowo, 2013).

Selama proses pembakaran, bahan bakar dan oksidator (seringkali udara), bersentuhan dan mengalami pembakaran. Proses pembakaran dapat dikategorikan menjadi dua jenis berdasarkan mekanisme kontak antara bahan bakar dan oksidator: premix dan non-premix. Premix mengacu pada proses pembakaran di mana bahan bakar dan oksidator digabungkan sebelum dinyalakan, sedangkan non-premix mengacu pada proses di mana bahan bakar dan oksidator dicampur dan dibakar pada saat yang bersamaan. Masing-masing metode ini juga dapat memiliki rezim aliran yang berbeda. Reaksi kimia pembakaran dapat dilihat pada Persamaan 2.1.



Bahan bakar mengandung unsur-unsur sebagai pembentuk reaksi pembakaran yang dilengkapi oksigen, diantaranya yaitu hidrogen, karbon, juga sulfur. Artinya apabila ketiga unsur itu bereaksi terhadap oksigen akan menghasilkan reaksi pembakaran. Reaksi pembakaran dari unsur-unsur tersebut ditunjukkan dalam rumus pembakaran berikut ini :

Reaksi pembakaran karbon sempurna dapat dilihat pada Persamaan 2.2.



Reaksi pembakaran karbon tidak sempurna dapat dilihat pada Persamaan 2.3.



Reaksi pembakaran hidrogen dapat dilihat pada Persamaan 2.4.



Reaksi pembakaran sulfur dapat dilihat pada Persamaan 2.5

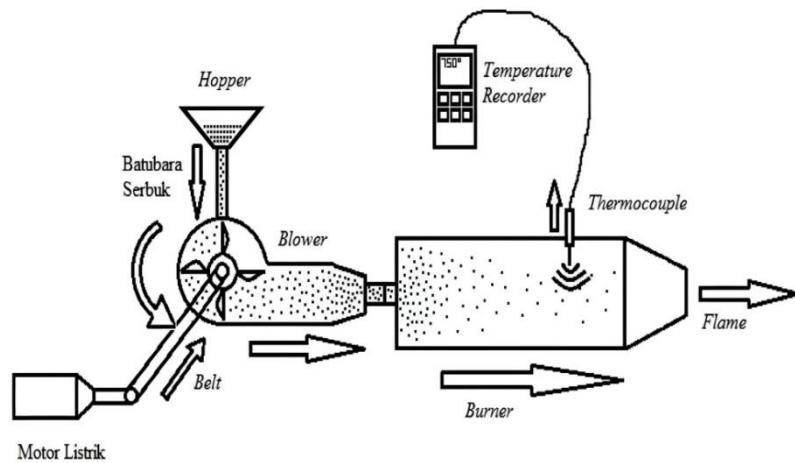


2.6.1 Pulverized combustion

Proses menghasilkan energi dari batubara biasanya melibatkan pemanfaatan teknologi pembakaran bubuk. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan interaksi luas permukaan antara batubara dan oksigen, sehingga menjamin pembakaran yang lebih menyeluruh. Pembakaran terjadi pada seluruh permukaan partikel ketika batubara berbentuk bubuk. Dengan menggunakan metode ini, kita dapat mengurangi durasi pembakaran dan menghasilkan jumlah uap yang jauh lebih besar dalam waktu singkat (Amrul dkk., 2022).

Sistem pembakaran bubuk atau pulverized combustion memberikan kemungkinan untuk mencampur berbagai bentuk bahan bakar, seperti batu bara dan biomassa, melalui co-firing atau co-combustion. Pembakaran batu bara dan biomassa secara bersamaan dapat menjadi metode yang tepat untuk mengurangi konsumsi batu

bara sekaligus memitigasi emisi gas rumah kaca. Sebelum menerapkan co-firing, penting untuk memahami atribut spesifik pembakaran batu bara dan biomassa, khususnya dalam sistem pembakaran bubuk. Sistem pembakaran serbuk dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema alat uji sistem pembakaran serbuk (Amrul dkk., 2022)

2.7 Efisiensi Pembakaran

Proses pembakaran bergantung pada derajat optimalisasi agar dapat terjadi. Pembakaran yang optimal menunjukkan tingkat efisiensi yang tinggi pada proses yang terjadi. Efisiensi pembakaran juga dapat didefinisikan sebagai sejauh mana energi yang ada dalam bahan bakar diubah secara efektif menjadi energi yang dapat digunakan. Memaksimalkan efisiensi mengurangi pemborosan energi dan meminimalkan energi yang tidak dapat digunakan. Karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) merupakan penanda penting efektivitas proses pembakaran. Guo dan Zhong (Guo & Zhong, 2018) menggunakan persamaan

yang mengandalkan tingkat karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan selama pembakaran, seperti yang digambarkan Persamaan 2.6.

$$\eta = \frac{C_{CO_2}}{C_{CO} + C_{CO_2}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots \quad (2.6)$$

2.8 Air Fuel Ratio (AFR)

Rasio komparasi mengenai pencampuran bahan bakar terhadap udara menjadi faktor penting untuk menentukan hasil dari tahapan pembakaran, dimana secara langsung mempengaruhi ciri-ciri dari api yang dihasilkan. Pencampuran bahan bakar pada kondisi stoikiometri dapat mencapai kecepatan pembakaran maksimum. Besaran angka AFR (air fuel ratio) juga ditentukan dengan membandingkan massa udara dengan jumlah bahan bakar yang dikonsumsi dalam reaksi pembakaran. Jika pembacaan arus melebihi nilai AFR maka menandakan terjadi kelebihan udara pada proses pembakaran. Nilai AFR dapat dicari dengan Persamaan 2.7.

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad \dots \dots \dots \quad (2.7)$$

2.9 Co-firing

Co-firing adalah pembakaran dua material berbeda secara bersamaan. *Co-firing* merupakan metode yang efektif untuk mengurangi emisi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. *Co-firing* adalah teknik yang layak untuk menghasilkan listrik dari biomassa dengan mengganti sebagian batubara dengan biomassa di unit pembangkit listrik. Biomassa ditandai dengan tidak adanya emisi

CO₂, sehingga tidak berkontribusi terhadap penumpukan CO₂ di atmosfer. Selain itu, biomassa memiliki kandungan sulfur yang lebih rendah dibandingkan batubara. Oleh karena itu, proses pembakaran batu bara dan biomassa secara bersama-sama menghasilkan pengurangan emisi karbon dioksida (CO₂) serta tingkat polutan nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur oksida (SO_x) yang berasal dari bahan bakar fosil (Winaya & Susila., 2010). Pembakaran batubara yang menggunakan biomassa atau *co-firing* dapat dipahami sebagai proses pembakaran batubara dan biomassa secara bersamaan.

Komponen sistem yang memenuhi fungsi peralatan *boiler* memiliki bahan bakar batu bara. Biomassa menunjukkan netralitas karbon sehingga baik untuk lingkungan dikarenakan unsur yang dikeluarkan ketika dilakukan pembakaran utamanya yakni karbon dioksida berasal dari aktivitas tanaman yang berfotosintesis. Meski begitu, jika membandingkan *co-firing* biomassa dengan *co-firing* batu bara, salah satu kelemahan dalam pembakaran biomassa yaitu besaran angka kalornya rendah yang mana dapat menyebabkan kerusakan pada tungku dan menyebabkan slagging. Ketika biomassa digabungkan dengan batu bara, ia bertindak sebagai katalis untuk menurunkan suhu yang diperlukan untuk pembakaran dan meningkatkan daya pembakaran secara keseluruhan (Zaenal dkk., 2021). Selain itu, perubahan ini sebagian besar disebabkan oleh menipisnya bahan bakar fosil dan permasalahan lingkungan seperti emisi gas rumah kaca (GRK) dan pelepasan senyawa beracun melalui gas buang selama pembakaran batu bara. Unsur kimia yang berpotensi membahayakan atau beracun yaitu unsur logam seperti arsenik, barium, bismut, kadmium, kromium, tembaga, galium, nikel, timbal, antimon, timah, seng, dan lain-lain. Unsur-unsur ini mempunyai

kemampuan menimbulkan risiko kesehatan yang serius jika berada dalam konsentrasi tinggi. Selain itu, pelepasan emisinya ke lingkungan saat ini merupakan suatu hal yang memprihatinkan.

Upaya yang sedang berjalan untuk meningkatkan kualitas biomassa terus mengalami kemajuan, dengan torefaksi menjadi salah satu metode yang layak dilakukan. Proses dekomposisi termal terdiri dari tahapan berbeda yang bervariasi sesuai dengan suhu pembakaran. Tahap dehidrasi terjadi pada suhu antara 25 dan 135 °C, di mana air dihilangkan. Tahap pembakaran dan pelepasan komponen yang mudah menguap berlangsung pada suhu berkisar antara 200 hingga 500 °C. Tahap oksidasi dan kelelahan terjadi pada suhu antara 500 dan 800 °C. Co-firing secara signifikan mengurangi emisi SO₂ akibat rendahnya kandungan sulfur dan nitrogen dalam biomassa ketika terkena suhu tinggi. Pengurangan emisi sulfur dioksida (SO) selama pembakaran bersama juga dapat dikaitkan dengan dampak penangkapan logam alkali dan alkali tanah dari biomassa melalui proses sulfasi. Peng Wang, dkk., meneliti atribut pembakaran cocombustion.

Memanfaatkan sampel cangkang sawit (PKS) sebagai biochar bersama batubara antrasit. Analisis termogravimetri digunakan untuk mengevaluasi sifat pembakaran bersama dan perilaku kinetik campuran batubara bubuk dan biochar. Sebuah studi sistematis dilakukan untuk menyelidiki perbedaan reaktivitas pembakaran antara batubara dan PKS dengan memeriksa ciri fisik dan kimianya. Belum ada investigasi sebelumnya mengenai pembakaran bersama batubara dan biomassa TKKS yang difraksikan yang memasukkan atau melaporkan data mengenai emisi yang dihasilkan.

Pada masa kini, terdapat tiga jenis penggunaan dari konfigurasi *co-firing* ada yang mencakup: *direct co-firing*, *indirect cofiring*, dan *parallel co-firing*.

a. *Direct Co-firing*

Dalam pengaturan ini, biomassa, yang berfungsi sebagai bahan bakar sekunder, dimasukkan ke dalam *boiler* bersama batubara, sebagai bahan bakar utama. Penembakan bersama secara langsung (*direct co-firing*) merupakan metode yang banyak digunakan karena biayanya yang lebih rendah. Ada dua kemungkinan teknik untuk mengarahkan penembakan bersama. Langkah pertama melibatkan pencampuran dan pemrosesan biomassa dan batubara secara simultan sebelum disuplai ke burner. Selanjutnya, biomassa dan batubara pada awalnya diolah secara terpisah sebelum dikirim ke *burner*.

b. *Indirect Co-firing*

Konfigurasi co-firing tidak langsung melibatkan pemanfaatan gasifikasi biomassa, dimana gas yang dihasilkan dari gasifikasi biomassa selanjutnya dimasukkan ke dalam burner dan dibakar bersama batubara. Dengan menerapkan pengaturan ini, abu yang berasal dari biomassa akan dipisahkan dari abu batubara, sambil menjaga rasio co-firing yang sangat tinggi. Penembakan bersama secara tidak langsung terhambat oleh kurangnya belanja modal yang besar.

c. *Parallel Co-firing*

Co-firing paralel adalah proses pembakaran biomassa secara terpisah dari batu bara dalam pembakar dan ketel khusus. Pembakaran biomassa

menghasilkan uap, yang selanjutnya dimanfaatkan dalam sirkuit pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Meskipun biaya awal lebih tinggi dibandingkan dengan co-firing langsung, konfigurasi ini memiliki manfaat tersendiri. Pengaturan ini memungkinkan penggunaan bahan bakar dengan kandungan logam alkali dan klorin yang tinggi, sekaligus memastikan pemisahan abu yang dihasilkan dari pembakaran batu bara dan biomassa.

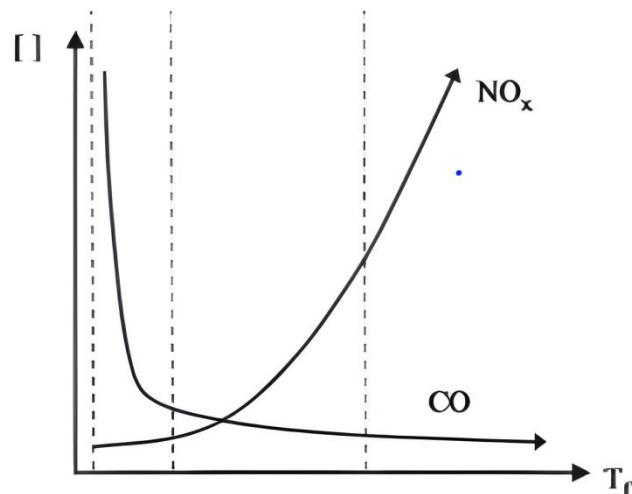
2.10 Emisi

Proses Proses pembakaran menghasilkan berbagai macam zat sisa. CO₂ adalah salah satu zat sisa yang dapat diserap habis oleh tumbuhan. Setiap proses pembakaran selalu menghasilkan emisi dan emisi akan muncul ketika pembakaran dimulai. Bentuk dan besar emisi yang dihasilkan akan dipengaruhi oleh kandungan udara, bahan bakar, juga temperatur pembakaran. Hal tersebut sebagaimana digambarkan dalam Gambar 2.9 saat temperatur awal pun emisi sudah muncul. Produksi CO₂ secara berkesinambungan mengalami peningkatan yang diakibatkan oleh pembakaran energi fosil secara besar-besaran. CO₂ yang dapat diserap tumbuhan hanya sebagian dan sebagian lainnya terperangkap di bumi yang dapat menimbulkan efek rumah kaca. Nitrogen oksida dan karbon monoksida juga dapat mengakibatkan masalah pernafasan dan bersifat karsinogenik. Karbon monoksida mengikat hemoglobin dalam darah sehingga darah kehilangan kemampuan untuk membawa oksigen. Faktor yang mempengaruhi produksi emisi antara lain, kandungan bahan bakar dan kualitas pembakaran. Berikut ini adalah penjelasan pengaruh temperatur terhadap emisi

yang dihasilkan. Berikut ini adalah penjelasan pengaruh temperatur terhadap emisi yang dihasilkan.

1. Nitrogen Oksida (NO_x)

Pemanasan menggunakan temperatur operasi tinggi dan pemanasan komponen pembakaran seperti pemanasan udara dan bahan bakar yang mana berfungsi untuk meningkatkan efisiensi termal. Pembakaran yang dioperasikan pada temperatur tinggi dengan akses udara tinggi akan mendukung pembentukan NO_x . Gambar 2.9 adalah peningkatan NO_x terhadap temperatur.



Gambar 2.9. Pengaruh temperatur terhadap emisi NO_x (McAllister dkk., 2010).

2. Karbon Monoksida

Emisi karbon monoksida dipengaruhi oleh temperatur yaitu Suhu pembakaran yang lebih tinggi mengakibatkan penurunan produksi gas CO karena entalpi

yang dihasilkan gas CO₂ lebih tinggi dibandingkan gas CO. Oleh karena itu, diperlukan suhu pembakaran yang lebih tinggi untuk menghasilkan gas CO₂. Pembakaran yang efisien menghasilkan pengurangan emisi karbon monoksida (CO) adalah pembakaran dengan temperatur yang tinggi.

3. Sulfur Oksida (SO_x)

Gas ini memiliki kelarutan yang tinggi dalam air, berbau, dan tidak berwarna. Pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung belerang menghasilkan pembentukan SO₂ dan gas oksida belerang lainnya. Belerang terdapat di hampir semua bahan mentah yang belum diolah, termasuk minyak mentah, batu bara, dan bijih yang mengandung logam. Saat dibakar belerang akan membentuk sulfur dioksida SO₂ atau SO₃. Sulfur dioksida SO₂ dapat bereaksi dengan H₂O. Reaksi antara sulfur dioksida dengan H₂O akan membentuk asam sulfat yang akan berdampak buruk. Pengaruh sulfur dioksida terhadap lingkungan adalah bersifat korosif dan juga beracun, sulfur dioksida merupakan penyebab dari terjadinya hujan asam.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Penelitian

Skema penelitian kali ini adalah melakukan pengujian emisi melalui proses *co-combustion* antara batu bara dengan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (TKKS). Pengujian dilakukan menggunakan alat *co-combustion burner* dengan sistem *pulverized* (pembakaran serbuk) skala laboraturium. Adapun beberapa tahapan yang dilalui dalam penelitian ini antara lain yaitu tahap studi literatur yang berasumber dari jurnal, internet dan lainnya.tahapan berikutnya adalah tahap persiapan alat dan bahan yang dimana bahan yang digunakan adalah batu bara dan TKKS yang telah tertorefaksi, pada tahap ini TKKS di torefaksikan menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular, TKKS ditorefaksikan pada temperatur 275°C dengan waktu tinggal selama 30 menit. Setelah itu tahap penyerbukan TKKS tertorefaksi dan Persiapan alat *co-combustion*. Pada tahap akhir dilakukannya pengujian pembakaran bersama antara batu bara dengan TKKS dengan melakukan pengambilan data, pengolahan dan analisa data yang diperoleh.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Tempat penelitian

Proses penelitian melibatkan tempat yang berbeda sesuai dengan tahapan pengerjaan yang dilakukan , adapun tempat tersebut antara lain :

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 Batubara Badan Pusat Penelitian dan Pengembangan TEKMIRA.
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).

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan mulai dari bulan Juni 2023 sampai dengan bulan Agustus 2023.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.3.1 Alat

Alat yang digunakan penulis dalam pengujian ini adalah :

1. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk menimbang berat batu bara serbuk dan TKKS yang akan digunakan dalam setiap variasi parameter pengujian. Kapasitas timbangan ini maksimal 7kg dengan ketelitian ± 1 gram. Timbangan digital yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Timbangan digital yang digunakan dalam penelitian *co-firing*.

2. Ayakan 200 *mesh*

ayakan yang digunakan untuk menyaring batu bara dan TKKS supaya memiliki ukuran yang seragam 200 mesh. Standar yang digunakan ASTM E:11. Ayakan 200 *mesh* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Ayakan 200 *mesh*.

3. Alat Uji Emisi

Alat uji emisi yang digunakan untuk mengukur kadar emisi pembakaran batu bara dan TKKS serbuk meliputi CO, SO₂, NOx. Alat uji emisi ini jenis E 6000-5DS *Portable Industrial Combustion Gas and Emissions Analyzer*. Alat ini dapat mengukur temperatur maksimal mencapai 1200°C dan dapat mengukur emisi CO dengan rentang 0-8000 mg/m³ , emisi NOx dengan rentang 0-5000 mg/m³ dan emisi SO₂ dengan

rentang 0- 5000 mg/m³. Alat uji emisi dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.3. Alat uji emisi yang digunakan dalam penelitian *co-firing*.

4. *Thermo Recorder*

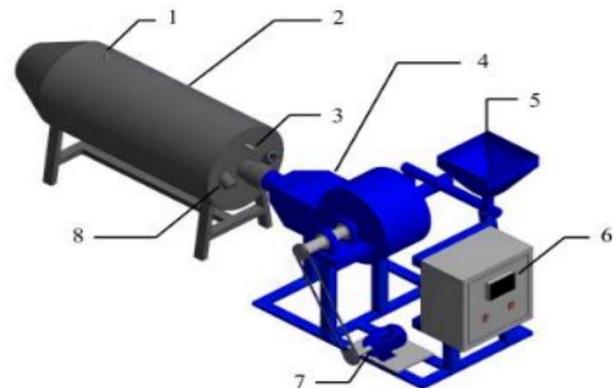
Thermo Recorder digunakan untuk mengukur temperature pembakaran bau bara dan TKKS serbuk didalam ruang bakar. Perekam temperatur ini dengan rentang temperatur -100- 1300°C dan dapat digunakan sampai 12 channels apabila menggunakan termokopel jenis K dan resolusi tampilan sebesar 1°C. *Thermo Recorder* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. *Thermo recorder* yang digunakan dalam penelitian *co-firing*.

5. *Pulverized Burner*

Pulverized burner yang digunakan untuk pembakaran serbuk dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. *Pulverized Burner*.

Keterangan gambar:

1. Termokopel 1

Termokopel 1 digunakan untuk mengukur temperatur yang berada di ujung ruang bakar.

2. Ruang bakar

Ruang bakar digunakan sebagai tempat terjadinya proses pembakaran.

3. Termokopel 2

Termokopel 2 digunakan untuk mengukur temperatur yang berada di pangkal ruang bakar.

4. Blower

Blower digunakan untuk mengalirkan serbuk batu bara dan TKKS dari penampungan batu bara ke ruang bakar.

5. *Hopper*

Penampungan digunakan untuk menampung batu bara dan TKKS sebelum masuk ke ruang bakar.

6. Panel

Panel berfungsi untuk melihat temperatur pada ruang bakar dan juga untuk mengoperasikan motor penggerak dan blower.

7. Motor listrik

Motor digunakan untuk memutar blower dengan penggunaan daya sebesar 220 V, daya ouput sebesar 0,5 HP dan kecepatan sebesar 3000 rpm.

8. Lubang udara sekunder

Lubang udara sekunder digunakan sebagai tempat masuknya udara sekunder.

3.3.2 Bahan

Adapula beberapa bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut :

1. Batu bara serbuk *sub-bituminous*

Batubara serbuk *sub-bituminous* dapat dilihat pada Gambar 3.6



Gambar 3.6. Batu bara serbuk *sub-bituminous*.

2. TKKS tertorefaksi

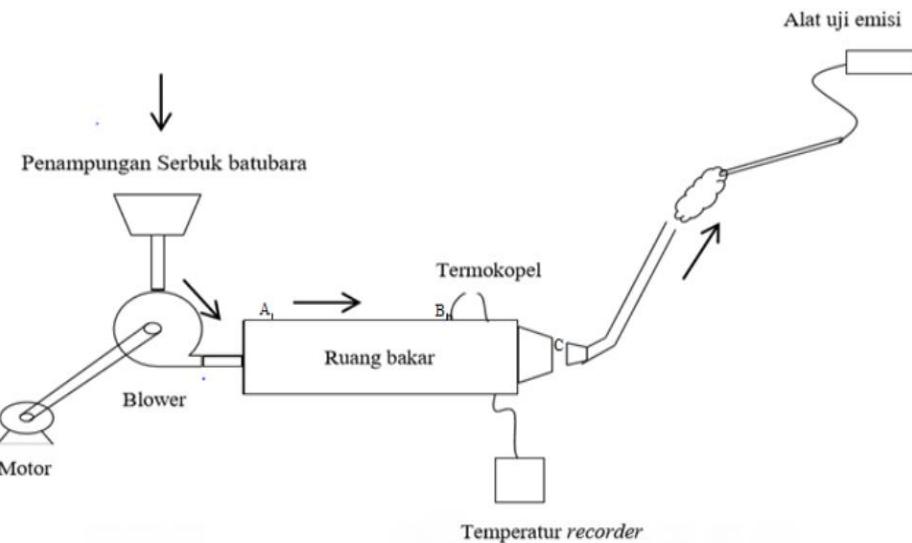
TKKS tertorefaksi dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. TKKS tertorefaksi.

3.4 Metode Pengambilan Data

Berikut merupakan prosedur pengujian dalam penelitian ini, untuk skema pengujian dapat dilihat pada gambar 3.7.



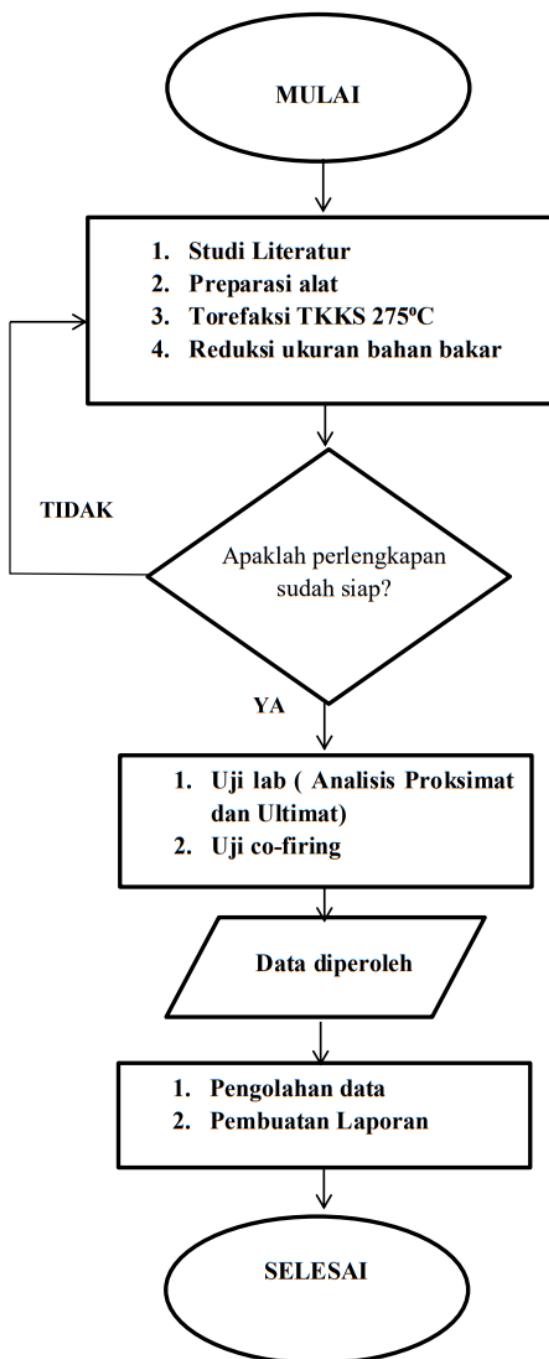
Gambar 3.8. Skema pengujian *co-firing*.

1. Mempersiapkan alat dan bahan lain yang digunakan dalam penelitian ini seperti batu bara, TKKS, ayakan, pemantik api, timbangan digital, *temperature recorder* dan *pulverized burner*.
2. Mengayak batu bara dan TKKS menggunakan ayakan berukuran 200 mesh.
3. Menimbang serbuk batu bara dan TKKS yang sudah diayak menggunakan timbangan digital, 1kg untuk setiap variasi komposisi.
4. Menghidupkan batu bara dan dimasukan kedalam pulverized burner.

5. Memulai proses pemanasan awal hingga temperatur awal pembakaran minimal mencapai 800°C.
6. Memasukkan serbuk batu bara ke dalam hopper.
7. Menghidupkan motor yang sudah terhubung dengan blower untuk menghembuskan serbuk batu bara menuju ruang bakar.
8. Membakar bahan bakar serbuk sampai terbakar habis.
9. Memulai pengujian emisi menggunakan alat E6000–5DS Portable Industrial Combustion Gas and Emission Analyzer bersamaan dengan terbakarnya bahan bakar serbuk.
10. Melihat hasil pengujian emisi pembakaran pada layar E6000–5DS Portable Industrial Combustion Gas and Emissions Analyzer.
11. Mencetak data hasil pengujian emisi pembakaran pada E6000–5DS Portable Industrial Combustion Gas and Emissions Analyzer.
12. Mengulangi langkah 6 sampai 13, namun menggunakan komposisi yang berbeda yaitu TKKS 100%, batu bara dan TKKS (90 : 10), (80 : 20). (70 :30).
13. Mencatat dan menganalisa hasil pengujian yang diperoleh.

3.5 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir dari penelitian pengaruh komposisi terhadap *co-combustion* batu bara dengan TKKS tertorefaksi:



Gambar 3.9. Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat di ambil dari Penelitian Pengaruh Rasio Komposisi Co-Combustion Batubara Dengan Tandan Kosong Kelapa Sawit Tertorefaksi Terhadap Emisi Gas Buang Hasil Pembakaran adalah sebagai berikut :

1. Co-firing dapat menurunkan emisi yang dihasilkan dari pembakaran, emisi semakin menurun seiring dengan bertambahnya persentase TKKS tertorefaksi di dalam campuran bahan bakar.
2. Efisiensi pembakaran semakin meningkat seiring dengan bertambahnya campuran TKKS tertorefaksi didalam bahan bakar. Dapat disimpulkan bahwa dari komposisi bahan bakar batubara dan TKKS dengan perbandingan (90:10), (80:20), dan (70:30) komposisi bahan bakar dengan perbandingan (70:30) merupakan kondisi terbaik dari co-firing batubara dengan TKKS tertorefaksi dikarenakan memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi dan emisi yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan perbandingan komposisi lainnya. Hal ini dikarenakan TKKS Tertorefaksi lebih mudah terbakar dibandingkan dengan batubara sehingga pada saat di campurkan dengan batubara dapat

meningkatkan reaktivitas pembakaran, dan juga pada TKKS tertorefaksi lebih banyak mengandung unsur oksigen (O_2) sehingga pembakarannya lebih sempurna dibandingkan dengan batubara.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan terkait dengan penelitian yang sudah dilakukan antara lain adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menambahkan variasi temperatur pembakaran.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait Co-firing batubara dengan TKKS tertorefaki menggunakan jenis burner yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrul, A., Wardono, H., & Chandra, N. D. (2022). Pengaruh variasi ukuran partikel terhadap profil suhu pada pembakaran batu bara sub bituminous dengan menggunakan pulverized burner. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 17(1), 97-100.
- Arhamsyah, A. (2010). Pemanfaatan biomassa kayu sebagai sumber energi terbarukan. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 2(1), 42-48.
- Arifandy, M. I., Cynthia, E. P., Muttakin, F., & Nazaruddin, N. (2021). Potensi Limbah Padat Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan Dalam Implementasi Indonesian Sustainability Palm Oil. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri*, 19(1), 116-122.
- Arifin, Z., Amrul, A., & Irsyad, M. (2021). Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (torrefied biomass). *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(1).

- Irawan, A., Riadz, T., & Nurmala, N. (2015). Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Kandungan Hemiselulosa Dan Uji Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor*, 15(3), 190-194.
- Mahidin, M., Khairil, K., Adisalamun, A., & Gani, A. (2009). Karakteristik Pembakaran Batubara Peringkat Rendah, Cangkang Sawit Dan Campurannya Dalam Fluidized Bed Boiler. *Reaktor*, 12(4), 253-259.
- Mahreni, M., Mitha, P. (2019). Pencucian Batu bara. Yogyakarta: LPPM UPN Veteran Yogyakarta-
- McAllister, S., Chen, Y.J., Pello, F.C.A. (2011). Fundamentals of Combustion Procceses. New York: Springer.
- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *Fuel*, 156, 177-189.
- PSDMBP, (2019). Sumber daya dan cadangan batubara Indonesia.
- Sepfitrah. (2016). Analisis Proximate Kualitas Batu bara Hasil Tambang di Riau. Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru.
- Triwibowo, B. (2014). Teori dasar simulasi proses pembakaran limbah vinasse dari industri alkohol berbasis CFD. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 2(2).

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.

Wander, P. R., Bianchi, F. M., Caetano, N. R., Klunk, M. A., & Indrusiak, M. L. S. (2020). Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity. *Energy*, 203, 117882.

Winaya, S., Susila, I. N. D., & Agung, I. B. (2010). Co-firing Sistem Fluidized Bed Berbahan Bakar Batubara dan Ampas Tebu. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 4(2), 180-188.

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, 124853.

Zink J, 2006. Combustion Hanbook Washington D,C. Charles E. Baukal, JR. Editor