

***CO-FIRING* BATUBARA SUB-BITUMINOUS B DAN TANDAN KOSONG  
KELAPA SAWIT TERTOREFAKSI: ANALISIS TERMOGRAVIMETRI,  
EFISIENSI PEMBAKARAN, EMISI DAN INDEKS *SLAGGING***

(Tesis)

Oleh

**ALI MUSTOFA  
NPM 1925021006**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### **CO-FIRING BATUBARA SUB-BITUMINOUS B DAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERTOREFAKSI: ANALISIS TERMOGRAVIMETRI, EFISIENSI PEMBAKARAN, EMISI DAN INDEKS *SLAGGING***

Ali Mustofa<sup>1</sup>, Amrul<sup>2</sup>, dan Muhammad Irsyad<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

<sup>2,3</sup>Dosen Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

Ketergantungan penggunaan bahan bakar fosil dan menipisnya persediaan bahan bakar fosil dalam satu dekade terakhir membuat pelaku energi mencari solusi energi alternatif. Penelitian ini menyajikan studi pembakaran bersama (*co-firing*) batubara sub-bituminous B dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi menggunakan metode *pulverized coal* skala laboratorium dengan komposisi campuran tandan kosong kelapa sawit mencapai 30%. Sebelum melakukan pembakaran, dilakukan pengujian bahan meliputi *thermogravimetry*, kandungan abu dan *ash fusion temperature*. Pembakaran dilakukan untuk mengetahui temperatur dan efisiensi pembakaran serta pembentukan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>. Hasil uji termogravimetri menunjukkan batubara sub-bituminous B mengalami gradien kehilangan massa tinggi pada temperatur 400-520°C senilai 65 µg/menit dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi mengalami gradien kehilangan massa tinggi pada temperatur 200-400°C senilai 473 µg/menit. Peningkatan persentase tandan kosong kelapa sawit dalam *co-firing* telah menurunkan temperatur dan meningkatkan efisiensi pembakaran serta mereduksi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>. *Excess air* pembakaran *single firing* batubara dan *co-firing* dapat mengurangi emisi CO, SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>. Komposisi kimia abu tandan kosong kelapa sawit banyak mengandung logam K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO dan Mg. Tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi memiliki nilai AFT rendah dengan nilai *deformation temperature* (DT) 1005°C. Batubara sub-bituminous B memiliki nilai *deformation temperature* (DT) 1520°C. Hasil skenario perhitungan *slagging index* menggunakan indeks Rb/s, Rs, AFI, Ai dan SR diperoleh proporsi penggunaan tandan kosong kelapa sawit dalam sistem *co-firing* yang masih aman mencapai 20%.

Kata kunci: Batubara, Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), Torefaksi, *Co-firing*, Emisi, *Slagging*

## ABSTRACT

### **STUDY OF CO-FIRING CHARACTERISTICS OF SUB-BITUMINOUS COAL AND TORREFACTION OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCH (THERMOGRAVIMETRY, COMBUSTION EFFICIENCY, POLLUTANT EMISSIONS, SLAGGING INDEX)**

Ali Mustofa<sup>1</sup>, Amrul<sup>2</sup>, dan Muhammad Irsyad<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Master student in Mechanical Engineering Department, Lampung University

<sup>2,3</sup> Lecture in Mechanical Engineering Department, Lampung University

Dependence on the use of fossil fuels and the depletion of fossil fuel supplies in the last decade has made energy players look for alternative energy solutions. This study presents a study of co-firing of sub-bituminous coal B and torrefaction oil palm empty fruit bunches using the laboratory scale pulverized coal method with a mixture composition of empty palm fruit bunches reaching 30%. Prior to burning, material testing is carried out including thermogravimetry, ash content and ash fusion temperature. Combustion is carried out to determine the temperature and combustion efficiency as well as the formation of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> gases. The results of the thermogravimetric test showed that sub-bituminous coal B experienced a high mass loss gradient at a temperature of 400-520°C worth 65 µg/minute and torrefaction oil palm empty fruit bunches experienced a high mass loss gradient at a temperature of 200-400°C worth 473 µg/minute. The presence of empty palm oil bunches in co-firing has lowered temperature and increased combustion efficiency and reduced SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. Excess air for single firing coal and co-firing can reduce CO, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions. The chemical composition of empty palm fruit bunch ash contains a lot of metal K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO and Mg. Torrefied empty fruit bunches of oil palm have a low AFT value with a deformation temperature (DT) of 1005°C. Sub-bituminous coal B has a deformation temperature (DT) value of 1520°C. The results of the slagging index calculation scenario use the Rb/s index. Rs, AFI, Ai and SR found that the proportion of using empty palm fruit bunches in the co-firing system is still safe, reaching 20%.

**Keywords:** Coal, Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB), Torrefaction, Co-firing, Emission, Slagging

***CO-FIRING* BATUBARA SUB-BITUMINOUS B DAN TANDAN KOSONG  
KELAPA SAWIT TERTOREFAKSI: ANALISIS TERMOGRAVIMETRI,  
EFISIENSI PEMBAKARAN, EMISI DAN INDEKS *SLAGGING***

Oleh

**ALI MUSTOFA**

(Tesis)

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
Magister Teknik

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

Judul Tesis : **CO-FIRING BATUBARA SUB-BITUMINOUS B DAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERTOREFAKSI: ANALISIS TERMOGRAVIMETRI, EFISIENSI PEMBAKARAN, EMISI DAN INDEKS SLAGGING**

Nama Mahasiswa : **Ali Mustofa**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1925021006

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

**MENYETUJUI**  
Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota

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

  
Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.  
NIP. 19711214 200012 1 001

**MENGETAHUI**

Ketua Jurusan  
Teknik Mesin

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin

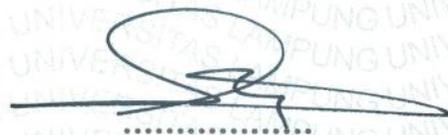
  
Dr. Amrul, S.T., M.T.  
NIP. 19710331 199903 1 003

  
Gusri A. Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19710817 199802 1 003

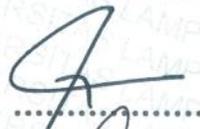
**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

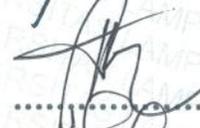
**Ketua : Dr. Amrul, S.T., M.T.**



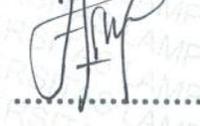
**Anggota Penguji : Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**



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

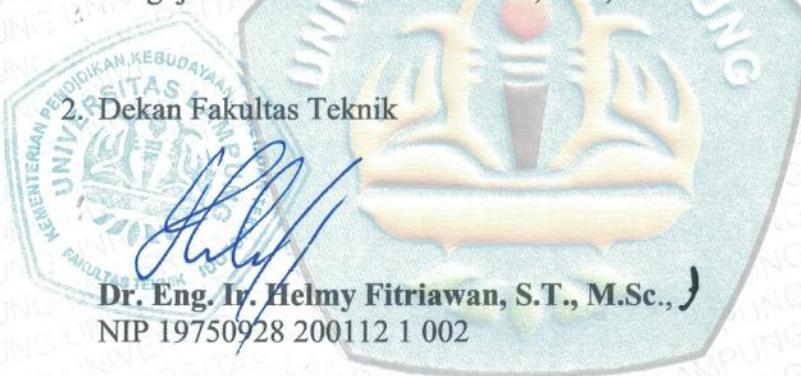


**Penguji Utama II : Dr. Harmen, S.T., M.T.**



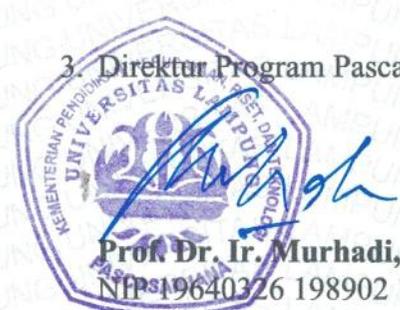
**2. Dekan Fakultas Teknik**

**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.,**  
NIP 19750928 200112 1 002



**3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung**

**Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.**  
NIP 19640326 198902 1 001



**Tanggal Lulus Ujian Tesis: 27 Mei 2023**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal70).

Bandar Lampung, Juni 2023

Yang Membuat



Ali Mustofa  
NPM 1925021006

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Restu Buana Kecamatan Rumbia Kabupaten Lampung Tengah pada 21 Oktober 1991, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dengan orang tua Bapak Bejo dan Ibu Jainem. Jenjang pendidikan pertama yang dijalani penulis adalah Pendidikan Sekolah Dasar Negeri 3 Restu Buana pada tahun 1997 hingga tamat tahun 2003. Selanjutnya penulis duduk di Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Rumbia, akhirnya pada tahun 2006 penulis lulus dari salah satu SMP negeri di kecamatan Rumbia. Kemudian pada tahun 2006 penulis berhenti mengenyam pendidikan formal, dan melanjutkan pendidikan informal yaitu belajar di Pondok Wali Barokah, Burengan, Banjarn, Kediri sampai awal tahun 2008. Kemudian penulis mempraktekkan ilmu yang diperoleh untuk mengajar di Taman Pendidikan Al-Quran di Desa Taman Fajar Kecamatan Purbolinggo Lampung Timur. Seiring dengan mengajar TPA, pada tahun 2008 penulis kemudian melanjutkan pendidikan formal di SMA N 1 Purbolinggo yang merupakan salah satu SMA favorit di Kabupaten Lampung Timur, akhirnya pada tahun 2011 penulis lulus dari jenjang pendidikan SMA. Selama menjalani pendidikan SMA, penulis aktif dalam organisasi intern sekolah. Penulis aktif dalam kegiatan KIR (Kreasi Ilmiah Remaja) dan pernah menjabat sebagai wakil ketua pada tahun 2009-2010, aktif dalam ekstra kurikuler Rohani Islam (Rohis) dan pada tahun 2010 penulis dapat menyumbangkan 1 gelar juara yaitu juara 1 tartil Al-quran

tingkat SMA se-Kabupaten yang diselenggarakan di Way Jepara, 1 gelar tingkat SMA se-Provinsi yaitu juara 3 tahfidz Al-quran yang diselenggarakan di SMA N 3 Metro. Selain itu penulis juga aktif dalam ekstra kurikuler sepak bola dan sering mengikuti turnamen-turnamen SMA di Tingkat Kabupaten dan sekitarnya.

Pada tahun 2011, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung (Unila) melalui seleksi yang pada waktu tersebut bernama Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Selama duduk di bangku kuliah, penulis mendapatkan beasiswa Peningkatan Prestasi Akademik (PPA) oleh DIKTI selama satu tahun. Selama berstatus mahasiswa, penulis pernah menjadi asisten mata kuliah Termodinamika tahun 2015. Kemudian menjadi asisten praktikum Fisika Dasar, Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika, Teknik Kendali dari tahun 2013-2015, menjadi asisten Pengkondisian Udara, Heat Exchanger, Heat Transfer tahun 2015-2016. Semasa kuliah pada tahun 2014, penulis melakukan kerja praktik di PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang dengan subjek yang dikaji adalah *Condition Monitoring Ultrasonic Bearing Motor* dan *Trending Vibrasi Gearbox Cooling Tower Fan* pada PLTP Unit IV PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang.

Mulai tahun 2013, penulis aktif menggeluti kegiatan hibah mahasiswa maupun penelitian Dosen dari DIKTI, dimana sepanjang kuliah penulis telah mengikuti 6 Hibah mahasiswa dan satu penelitian Dosen. Penulis juga aktif dalam komunitas kreativitas yang ada di kampus dengan salah satu kegiatannya adalah pembuatan mobil hemat energi. Selain itu penulis juga pernah merancang sebuah alat sterilisasi baglog jamur untuk industri kecil di Prabumulih Sumatera Selatan. Prestasi penulis dalam kancah nasional yaitu, penulis pernah menjadi 10 finalis

terbaik Lomba Nasional Rancang Bangun Mesin yang diadakan oleh Badan Kerjasama Teknik Mesin (BKSTM) Se-indonesia bekerja sama dengan AUTODESK di Banjarmasin tahun 2016 dan mendapatkan peringkat 6 Nasional. Untuk kancah lokal, penulis pernah menerima penghargaan dari Bupati Lampung Tengah atas keberhasilannya menjadi juara 1 kategori umum pada kegiatan Apresiasi Penelitian dan Pengembangan Teknologi Terapan Kabupaten Lampung Tengah tahun 2015. Untuk lingkup Unila, penulis pernah mendapatkan juara 1 poster Program Kreativitas Mahasiswa pada Dies Natalis ke-50 Universitas Lampung tahun 2015. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi. Adapun organisasi yang diikuti adalah Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) dan Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik, tahun 2012-2013 menjabat sebagai anggota Penelitian dan Pengembangan, tahun 2013-2014 sebagai sekretaris Peningkatan Sumber Daya Manusia (PSDM).

Setelah menyelesaikan perkuliahan strata-1, penulis fokus meniti karier dengan bekerja sebagai *Mechanical Engineer* dari februari 2017 sampai dengan tahun februari 2022 di PT. SWI Jetty Nusantara yang merupakan perusahaan yang bergerak di bidang jasa konstruksi laut. Sudah banyak proyek yang diikuti penulis diantaranya (1) pembangunan *coal unloading jetty* PLTU 2X1000 MW Batang (2) pembangunan Pelabuhan International Patimban Tahap 1 (3) pembangunan Pelabuhan Kijing (4) Instalasi *Sea water intake* PLTU unit 1 dan 2 (2X1000 MW) Batang (5) Instalasi *Sea water intake* PLTU unit 5&6 (2X1000 MW) Jepara dan (6) servis intake head PLTU Muara Karang. Februari 2022 penulis berpindah tugas dengan pindah bekerja di Kementerian Perindustrian penempatan Balai

Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Bandar Lampung dengan posisi sebagai Perakayasa sampai dengan saat ini.

Tahun 2019 Penulis melanjutkan pendidikan Pascasarjana (S2) di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung (UNILA) dengan mengambil konsentrasi konversi energi, sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik penulis melakukan penelitian Tesis dengan judul tugas akhir “*Co-firing* Batubara Sub-bituminous B dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Tertorefaksi: Analisis Termogravimetri, Efisiensi Pembakaran, Emisi dan Indeks *Slagging*” dibawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.

Bandar Lampung, Juni 2023

Penulis,

Ali Mustofa

## Ucapan Terima kasih

*Assalamu 'alaikum Wr. Wb.*

Puji syukur ke hadirat Allah SWT karena berkat limpahan rahmat, hidayah, dan Inayah-Nya maka TESIS ini dapat diselesaikan dengan baik. Salam dan solawat semoga selalu tercurah pada baginda Rasulullah Muhammad SAW.

Tesis yang berjudul "*Co-firing* Batubara Sub-bituminous B dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Tertorefaksi: Analisis Termogravimetri, Efisiensi Pembakaran, Emisi dan Indeks *Slagging*" ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan kurikulum sarjana strata-2 (S-2) pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Limpahan rasa hormat, cinta, kasih sayang dan terima kasih kepada bapak Bejo dan ibu Jainem yang mendidik dan membesarkan dengan penuh cinta kasih sayang yang begitu tulus kepada Penulis yang selalu memberikan doa di setiap detik kehidupannya untuk keberhasilan Penulis. Limpahan kasih sayang dan cinta untuk Istri penulis Medi Kurnia Putri yang telah mendampingi, memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan studi Magister. Kepada anak-anak penulis Bilal Hanan Mustofa dan Buhiya Armora Zenit M sebagai yang telah hadir di kehidupan selama melaksanakan studi. Serta saudari Andin Windi Melani serta keluarga besar yang selama ini telah banyak memberikan doa, perhatian, kasih sayang, semangat

dan dukungannya kepada Penulis, semoga Allah SWT senantiasa mengumpulkan kita semua dalam kebaikan dan ketaatan kepada-Nya.

Penyelesaian Tesis 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. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Gusri A. Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Program Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang telah bersedia menyempatkan waktunya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
5. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua, yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
6. Dr. Amrizal, S.T., M.T., selaku dosen penguji I yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
7. Dr. Eng. Harmen, S.T., M.T., selaku dosen penguji II yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
8. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Magister Teknik Mesin yang banyak memberikan ilmu selama penulis melaksanakan studi, baik berupa materi perkuliahan maupun teladan dan motivasi.

9. Prof. Drs. Ir. Suharno, M. Sc., Ph.D. IPU, ASEAN Eng. selaku Bapak Mertua yang telah mendorong dan motivasi kepada penulis untuk melanjutkan Pendidikan ke jenjang Strata 2.
10. Teman-teman Pasca Sarjana Teknik Mesin (angkatan 2019), semoga kebersamaan dan persaudaraan kita tidak berakhir hanya di kampus ini.
11. Adik-adik Mahasiswa Strata 1 dan Diploma III yang telah membantu penyelesaian Tesis ini.
12. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini belum sempurna masih banyak kekurangan, baik dari segi isi maupun cara penyampaiannya. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata, Penulis berharap semoga laporan tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Amin.

*Wassalamu'alaikum Wr. Wb.*

Bandar Lampung, Juni 2023

Penulis,

Ali Mustofa

Motto

“Ingat Mati “

“Hidup Hanya Sekali, Lakukan Yang terbaik”

“Berikanlah Yang Terbaik, Maka Akan Mendapatkan Yang terbaik”

“Sesuatu yang direncanakan dengan baik akan mendapatkan yang terbaik”

“Bila ingin kuasai dunia, maka kuasai ilmunya”

## KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyajikan tulisan Tesis yang berjudul: “Kara *Co-firing* Batubara Sub-bituminous B dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Tertorefaksi: Analisis Termogravimetri, Efisiensi Pembakaran, Emisi dan Indeks *Slagging*”.

Sangat disadari bahwa dengan kekurangan dan keterbatasan yang dimiliki penulis, walaupun telah dikerahkan segala kemampuan untuk lebih teliti, tetapi masih dirasakan banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan saran yang membangun agar tulisan ini bermanfaat bagi yang membutuhkan.

Bandar Lampung, Juni 2023

Penulis,

Ali Mustofa

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>XVI</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>XIX</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>XX</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>XXII</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	23
1.2 Rumusan Masalah .....	31
1.3 Tujuan Penelitian .....	31
1.4 Batasan Masalah .....	32
1.5 Sistematika Penulisan Laporan .....	32
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Bahan Bakar Padat .....	34
2.1.1 Batubara .....	35
2.1.2 Grade Batubara .....	37
2.1.3 Biomassa Kelapa Sawit .....	39
2.2 Basis Komposisi Biomassa .....	42
2.2.1 <i>Ash received basis</i> .....	43
2.2.2 <i>Air dry basis</i> .....	43
2.2.3 <i>Total dry basis</i> .....	44
2.2.4 <i>Dry and ash-free</i> .....	44
2.3 Karakteristik Bahan Bakar Padat .....	44
2.3.1 Analisis proksimat .....	44

2.3.2 Analisis ultimat .....	46
2.3.3 Nilai kalor .....	47
2.3.4 Komposisi kimia abu .....	48
2.3.5 <i>Ash fusion temperature</i> (AFT) .....	49
2.3.6 <i>Hardgrove grindability index</i> (HGI) .....	50
2.3.7 Densitas energi .....	51
2.4 Torefaksi .....	52
2.5 Pembakaran Arang ( <i>Char</i> ) .....	54
2.5.1 Kinematika pembakaran <i>char</i> .....	54
2.5.2 Densifikasi <i>char</i> .....	56
2.6 <i>Co-firing</i> .....	57
2.6.1 Teknologi <i>co-firing</i> .....	58
2.6.2 Penguraian emisi melalui teknologi <i>co-firing</i> .....	59
2.7 Formasi Terak Abu .....	62
2.7.1 <i>Slagging</i> .....	65
2.7.2 <i>Fouling</i> .....	66
2.8 Analisis Indeks Pembentukan <i>Slagging</i> .....	67
2.8.1 Rasio asam basa .....	67
2.8.2 <i>Indeks Asam Basa</i> .....	68
2.8.3 <i>Sulfur slagging index</i> .....	69
2.8.4 <i>Alkali Index</i> .....	69
2.8.5 <i>Silika alumina index</i> .....	69
2.8.6 <i>Slag Viscosity index</i> .....	70
2.8.7 <i>Fouling Index</i> .....	71
2.8.8 <i>Bed agglomeration index</i> .....	71
2.8.9 <i>Ash Fusibility index</i> .....	72

### III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian .....	73
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian .....	74
3.2.1 Tempat penelitian .....	74
3.2.2 Waktu Penelitian .....	76

3.3 Bahan Bakar Padat dan Peralatannya .....	76
3.3.1 Bahan Bakar Padat .....	76
3.3.2 Uji laboratorium bahan bakar padat .....	77
3.3.3 Persiapan peralatan <i>co-firing</i> .....	80
3.4 Proses Pengujian <i>co-firing</i> .....	81
3.4.1 Preparasi sampel .....	82
3.4.2 Pemanasan awal burner .....	82
3.4.3 Pengujian <i>co-firing</i> .....	83
3.4.4 Penentuan <i>slagging index</i> .....	85
3.4.5 Penentuan <i>slagging index</i> .....	86

#### **IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Sifat BB-SBB dan TKKS-TRF .....	87
4.2 Perilaku Termal BB-SBB, TKKS-TRF dan Campuran .....	88
4.3 Efisiensi Pembakaran .....	95
4.4 Emisi Polutan .....	99
4.4.1 Pengaruh TKKS-TRF terhadap Pembentukan SO <sub>2</sub> dan NO <sub>x</sub> ....	99
4.4.2 Pengaruh excess air terhadap Pembentukan SO <sub>2</sub> dan NO <sub>x</sub> .....	102
4.5 Analisis Indeks <i>Slagging</i> .....	103

#### **V. KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan .....	111
5.2 Saran .....	112

#### **DAFTAR PUSTAKA**

#### **LAMPIRAN**

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Kandungan Oksigen menurut Gugus Fungsi (%) .....	35
2.2 Komposisi kimia residu kelapa sawit .....	41
2.3 Analisis proksimat dan ultimat .....	47
2.4 Nilai kalor sampel .....	48
2.5 Komposisi kimia abu TKKS .....	49
3.1 Jadwal Penelitian .....	76
3.2 Kebutuhan udara pembakaran .....	84
3.3 Kebutuhan udara primer & sekunder .....	84
3.4 Pengambilan data analisis .....	86
4.1 Hasil uji kualitas bahan bakar pada .....	87
4.2 Hasil uji komposisi kimia abu BB-SBB & TKKS-TRF .....	104
4.3 Hasil uji AFT BB-SBB dan TKKS-TRF .....	105
4.4 Metode indeks empiris prediksi kecenderungan <i>slagging</i> .....	106
4.5 Hasil prediksi <i>slagging</i> BB-SBB, TKKS-TRF dan campuran .....	106

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Rasio ikatan atom bahan bakar padat.....	34
2.2 Usia geologis batubara di dunia .....	36
2.3 Grade Batubara .....	37
2.4 Klasifikasi biomassa .....	39
2.5 Pemanfaatan produk samping kelapa sawit .....	40
2.6 Grafik analisis proksimat TKKS .....	41
2.7 Grafik analisis ultimat TKKS .....	42
2.8 Basis komposisi biomassa .....	43
2.9 Bentuk fusi abu .....	50
2.10 Densitas energi bahan bakar padat .....	52
2.11 Proses dekomposisi kandungan biomassa .....	53
2.12 Biaya reduksi CO <sub>2</sub> by CCS vs <i>co-firing</i> .....	58
2.13 Skema teknologi <i>co-firing</i> .....	59
2.14 Fenomena pembentukan deposit abu di boiler PLTU .....	63
2.15 Penampakan <i>slagging</i> .....	65
2.16 Penampakan <i>fouling</i> .....	66
3.1 Diagram Alir Kegiatan Penelitian .....	73
3.2 <i>Thermogravimetric Analyzer</i> (TGA-501) by Leco .....	78
3.3 Alat uji <i>ash fusion temperature</i> .....	80
3.4 Skema diagram pembakaran serbuk .....	80
3.5 Posisi penempatan <i>thermocouple</i> .....	82
3.6 <i>Temperature recorder</i> .....	83
3.7 <i>Screw conveyor</i> .....	83
3.8 <i>Gas analyzer</i> .....	85
4.1 Bahan bakar BB-SBB, TKKS-TRF dan campurannya .....	88

4.2 Kurva TG dan DTG BB-SBB dan TKKS-TRF .....	89
4.3 Kurva DTG BB-SBB, TKKS-TRF dan campurannya .....	93
4.4 Kurva waktu pembakaran dan temperatur hasil pembakaran .....	95
4.5 Konsentrasi CO, CO <sub>2</sub> dan efisiensi pembakaran <i>co-firing</i> .....	96
4.6 Konsentrasi CO, CO <sub>2</sub> dan efisiensi pembakaran variasi AFR .....	98
4.7 Pengaruh TKKS-TRF pada pembentukan gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>x</sub> .....	100
4.8 Pengaruh udara pada pembentukan gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>x</sub> .....	103

## DAFTAR SIMBOL

%	=	Persen
°C	=	Derajat Celcius
µg	=	Mikro gram
ad	=	<i>Air dry basis</i>
AFI	=	<i>Ash fusibility index</i>
AFR	=	<i>Air fuel ratio</i>
AFT	=	<i>Ash fusion temperature</i>
AI	=	<i>Alkali Index</i>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	Aluminium oksida
ARB	=	<i>As-received basis</i>
ASH	=	Abu
ASTM	=	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B/A	=	Indeks asam basa
BAI	=	<i>Bed agglomeration index</i>
BB-SBB	=	Batubara sub-bituminous B
Btu	=	<i>British thermal unit</i>
C	=	Karbon
CaO	=	Kalsium oksida
C <sub>co</sub>	=	Konsentrasi kandungan karbon monoksida
C <sub>co2</sub>	=	Konsentrasi kandungan karbon dioksida
CCS	=	<i>Carbon capture storage</i>
Cd	=	Kadmium
C <sub>DAF</sub>	=	Persentase karbon <i>Dry and ash-free</i>
CH <sub>4</sub>	=	Metana
CO	=	Karbon monoksida
CO <sub>2</sub>	=	Karbon dioksida

D	= Diameter
DAF	= <i>Dry and ash-free</i>
DT	= <i>Deformation temperature</i>
DTG	= <i>Derivative thermogravimetric</i>
EBT	= Energi baru dan terbarukan
FC	= <i>Fix Carbon</i>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= Besi (III) oksida
FeO	= Besi (II) oksida
FeS	= Besi (II) sulfida
FM	= <i>Free moisture</i>
FT	= <i>Flow temperature</i>
Fu	= <i>Fouling index</i>
G	= <i>Silika ratio</i>
GRK	= Gas rumah kaca
H	= Hidrogen
H <sub>2</sub> O	= Air
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	= Hujan asam
HGI	= <i>Hardgrove grindability index</i>
HHV	= <i>High heating value</i>
HT	= <i>Hemispherical temperature</i>
IM	= <i>Inheren moisture</i>
K <sub>2</sub> O	= Potassium oksida
Kcal	= Kilo kalori
Kg	= Kilo gram
Lb	= <i>Pound</i>
LHV	= <i>Low heating value</i>
M	= <i>Total moisture</i>
M <sup>3</sup>	= Meter kubik
M <sub>a</sub>	= <i>Massa surface moisture</i>
MgO	= Magnesium oksida
MJ	= Mega joule
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	= <i>Manganese (II, III) oxide</i>

$\eta$	= Efisiensi
N	= Nitrogen
Na <sub>2</sub> O	= Sodium oksida
NO <sub>x</sub>	= Nitrogen oksida
O	= Oksigen
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= Diphosphor Trioksida
Pb	= Timbal
PPM	= Pert per million
R <sub>B/A</sub>	= Rasio asam basa
R <sub>s</sub>	= <i>Sulfur slagging index</i>
R <sub>S/A</sub>	= <i>Silika alumina index</i>
S	= Sulfur
SiO <sub>2</sub>	= Silikon dioksida
S <sub>r</sub>	= <i>Slag viscosity index</i>
SO <sub>2</sub>	= Sulfur dioksida
SO <sub>3</sub>	= Sulfur trioksida
ST	= <i>Softening temperature</i>
TBS	= Tandan buah segar
Td	= <i>Total dry basis</i>
TG	= <i>Thermogravimetric</i>
TGA	= <i>Thermogravimetric analysis</i>
TiO <sub>2</sub>	= Titanium dioksida
TKKS	= Tandan kosong kelapa sawit
TKKS-TRF	= Tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi
TM	= <i>Total Moisture</i>
V <sub>air</sub>	= Kecepatan udara
VM	= <i>Volatile Matter</i>
Zn	= Seng
C <sub>td</sub>	= Persentase karbon <i>total dry basis</i>
C <sub>ad</sub>	= Persentase karbon <i>air dry basis</i>

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi biomassa semakin menarik minat karena kekhawatiran tentang keamanan pasokan bahan bakar fosil di masa depan, konsumsi bahan bakar fosil yang berlebihan dan harga yang terus meningkat. Selain itu, CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim yang mengancam dunia (Yousaf dkk., 2017). Saat ini, Kebutuhan energi masih didominasi dengan sumber daya energi fosil . Diantara bahan bakar fosil, emisi karbon batubara merupakan yang paling tinggi dan pelepasan unsur-unsur yang mencemari lingkungan selama pembakaran batubara berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan (Yousaf dkk., 2017).

Di Indonesia, lebih dari 60% pembangkit listrik masih menggunakan batubara dan ini akan terus bertambah mengingat masih banyak daerah yang defisit listrik (Arinaldo & Adiatama, 2019). Di level internasional, Indonesia tercatat sebagai salah satu konsumen energi terbesar dunia, sektor penggunaan energi Indonesia menyumbang 35% dari total emisi gas rumah kaca (GRK) di seluruh dunia (IRENA, 2017)(Wijaya dkk., 2017). Dalam kegiatan *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), Indonesia melalui *Nationally Determined Contribution* (NDC) berjanji untuk menurunkan emisinya sebesar 29% (atau 41% dengan bantuan internasional) pada tahun 2030 yaitu dengan mempromosikan bauran pasokan energi baru dan terbarukan (EBT) telah

dinyatakan sebagai salah satu strategi untuk mencapai target (KLHK, 2016). Diantara beberapa sumber energi terbarukan yang tersedia, Indonesia diproyeksikan akan bergantung pada *bioenergy* (51% dari total konsumsi energi) pada tahun 2030 (KLHK, 2016). Untuk mewujudkan komitmen NDC, Pemerintah Indonesia menerbitkan Peraturan tentang Kebijakan Energi Nasional yang menargetkan setidaknya 23% energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (PP No. 79, 2014).

Di sisi lain, Indonesia mempunyai luasan lahan sawit sebesar 14,456 juta hektare (BPS, 2020). Dengan luas lahan tersebut, dapat menghasilkan tandan buah segar 20 ton tandan buah segar (TBS)/hektar setiap tahunnya. Dengan persentase tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap tandan buah segar sekitar 22% dengan kandungan kadar air sekitar 65% (Abu Bakar dkk., 2008). Potensi biomassa TKKS kering yang dapat dihasilkan oleh lahan sawit tersebut diperkirakan 22.262 juta ton per tahun dari rumus perhitungan oleh Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI, 2017). TKKS memiliki nilai kalor sekitar 14,8 MJ/kg atau 3535 kcal/kg (Wahyudi dkk., 2020) (Iryani dkk., 2019)(Madhiyanon dkk., 2012). sehingga potensi energi yang dapat dihasilkan mencapai  $3,294 \times 10^8$  MJ/tahun. TKKS merupakan residu industri perkebunan kelapa sawit yang belum maksimal dimanfaatkan sampai saat ini. Sehingga sangat potensial apabila dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif karena ketersediaannya yang melimpah, dapat diperbarui, dan kemungkinan konversi ke produk bernilai tambah lebih tinggi (Wahyudi dkk., 2020). Selain itu, tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan bahan bakar netral CO<sub>2</sub>, karena beberapa peneliti berpendapat bahwa pohon yang

tumbuh menyerap CO<sub>2</sub> yang dipancarkan selama pembakaran menciptakan lingkaran karbon tertutup (Yildiz dkk., 2016).

Secara umum pemanfaatan penggunaan TKKS sebagai bahan bakar memberikan dampak positif dalam upaya mengurangi penggunaan batubara untuk kelanjutan ekosistem lingkungan karena penggunaan biomassa menghasilkan karbon netral. TKKS juga memiliki kandungan sulfur dan nitrogen yang rendah sehingga dapat mengurangi pembentukan gas SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> selama pembakaran (Arifin dkk., 2021)(Krzywanski dkk., 2013). Namun, penggunaan biomassa sebagai bahan bakar tunggal secara umum mudah menimbulkan masalah *slagging* dan *fouling* karena banyak mengandung logam alkali dan alkali tanah (Nutalapati dkk., 2007). *Slagging* sangat merugikan bila terbentuk di pipa boiler karena resistan perpindahan panas antara *flue gas* dengan boiler, sehingga menyebabkan penurunan penyerapan perpindahan panas ke fluida boiler dan akan menaikkan temperatur gas buang dengan efek lanjutan menurunnya produk uap dan turunnya efisiensi boiler (Madhiyanon dkk., 2012).

Dalam 1 dekade terakhir ini banyak perhatian mengenai pembakaran bersama batubara dan biomassa dengan konsentrasi tertentu atau sering disebut metode *co-firing* karena tidak hanya dapat mengurangi emisi polutan, tetapi juga secara efektif meminimalisasi pembentukan terak (Lu dkk., 2017). Penggunaan teknologi *co-firing* merupakan pilihan yang relatif lebih murah dan tidak memerlukan investasi pembangkit listrik baru. Analisis termogravimetri merupakan metode yang dipandang paling mudah dan efektif untuk mengamati profil pembakaran bahan bakar (Yousaf dkk., 2017)(Cong dkk., 2019)(Otero dkk., 2002).

Analisis termogravimetri yang dilakukan oleh Wang dkk dan Mundike dkk (P. Wang dkk., 2018)(Mundike dkk., 2018) menemukan bahwa penambahan biomassa pada pembakaran batubara dapat menurunkan temperatur pengapian. Wang dkk melakukan penelitian tentang karakteristik *co-combustion* dan perilaku kinetik dari bubuk batubara antrasit dan arang cangkang kelapa sawit. Pembuatan cangkang kelapa sawit melalui proses devolatilisasi di bawah temperatur 600 °C. Hasil uji termogravimetri menunjukkan arang cangkang kelapa sawit lebih reaktif daripada batubara antrasit karena urutan struktur kristal dan derajat grafitisasinya yang lebih rendah, struktur pori yang lebih berkembang dengan baik, dan kandungan oksida logam alkali yang lebih tinggi. Campuran bubuk arang cangkang kelapa sawit dapat meningkatkan reaktivitas pembakaran batubara antrasit. Sedangkan Mundike melakukan studi terkait *co-firing* 3 jenis batubara dengan arang torefaksi pohon tembelek dan arang torefaksi mimosa pigra. Torefaksi dilakukan dengan dua variasi temperatur yaitu 300°C dan 500°C. Mundike dkk melakukan analisis termogravimetri dan performa pembakaran. Hasil penelitian menunjukkan arang biomassa kedua bahan memiliki reaktivitas pembakaran lebih tinggi di bandingkan batubara. Hasil uji performa pembakaran memberikan hasil bahwasanya adanya biomassa torefaksi dalam sistem *co-firing* telah menurunkan temperatur pembakaran. Semakin tinggi proses torefaksi juga menurunkan temperatur pembakaran.

Jayaraman dkk (Jayaraman dkk., 2017) juga melakukan analisis termogravimetri batubara bituminous dan biomassa. Biomassa yang digunakan yaitu *poplar wood* dan kulit kemiri. Campuran biomassa yang digunakan yaitu 0%, 25%, 50%,75% dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan ketika persentase

biomassa meningkat dalam campuran batubara-biomassa, laju kehilangan massa maksimum meningkat yang menunjukkan reaktivitas sampel yang lebih tinggi. Ini mengonfirmasi bahwa penambahan biomassa pada pembakaran batubara dapat meningkatkan laju kehilangan massa.

Hasil-hasil ini membuat para peneliti mengevaluasi kinerja pembakaran bersama batubara dan biomassa yang komprehensif. Penelitian yang dilakukan oleh Wander dkk terkait *co-firing* batubara kelas rendah dengan serbuk gergaji pinus 5-15% pada sistem pembakaran unggun terfluidasi dengan variabel *excess air* dan kecepatan fluidasi. Hasil penelitian Wander mengatakan bahwa kombinasi pembakaran batubara dan biomassa merupakan alternatif yang layak untuk mengurangi emisi tanpa mengganggu efisiensi (Wander dkk., 2020). Penelitian yang dilakukan oleh Armesto dkk terkait *co-firing* batubara (lignite dan antrasit) dan residu dari industri minyak zaitun pada sistem pembakaran unggun terfluidasi. Penelitian Armesto dkk menemukan bahwa penambahan sejumlah biomassa pada pembakaran batubara (10-25%) tidak mempengaruhi efisiensi pembakaran (Armesto dkk., 2003). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Xue dkk (Xue dkk., 2020) yang melakukan kajian tentang *co-firing* batubara 70% ukuran 0,8-1,2 mm dan jerami gandum 30% ukuran 1,4-1,8 dengan variasi temperatur pembakaran dan *excess air* pada sistem *bubbled fluidized bed combustor* skala laboratorium melaporkan bahwa sistem *co-firing* telah menurunkan pembentukan gas SO<sub>2</sub>, NO dan CO. Dengan menurunnya gas CO telah meningkatkan efisiensi pembakaran. Temperatur juga mempengaruhi konsentrasi emisi gas buang. Semakin tinggi temperatur menyebabkan kenaikan konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO, namun semakin tinggi temperatur dapat menurunkan konsentrasi gas CO. Peningkatan *excess air*

telah mereduksi pembentukan gas SO<sub>2</sub>, NO dan CO. Guo dkk (Guo & Zhong, 2018) juga melakukan penelitian *co-firing* dengan batubara antrasit dengan ukuran <1mm dan pelet kayu dengan ukuran diameter 8 mm panjang 10mm. Tipe pembakaran yang di pilih yaitu pembakaran unggun terfluidasi skala laboratorium. Guo dkk juga melakukan uji termogravimetri. Hasil penelitian yang dilakukan Guo dkk menginformasikan bahwa pembakaran bersama batu bara dan pelet kayu dapat meningkatkan reaksi pembakaran dan mengurangi emisi polutan gas, seperti SO<sub>2</sub> dan NO. Efisiensi pembakaran menurun dalam sistem *co-firing* karena dipengaruhi ukuran pellet kayu yang lebih besar daripada batubara sehingga menyebabkan proses pembakaran kurang sempurna.

Secara umum, praktik pembakaran bersama (*co-firing*) dapat mengurangi emisi SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> dikarenakan menurunnya kandungan nitrogen dan sulfur yang terkandung di bahan bakar (Wei dkk., 2012). Sung DKK telah melakukan penelitian terkait pembakaran batubara dari bituminous Australia dan batubara sub-bituminous dari Kalimantan Selatan, Indonesia dengan biomassa kayu dari Indonesia dengan ukuran 118 µm, 122 µm, dan 286 µm. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mempelajari efek sinergis *co-firing* biomassa kayu terhadap kadar emisi NO<sub>x</sub> dan tingkat pembakaran karbon dalam *air-staged conditions*. Sistem pembakaran yang digunakan yaitu sistem pembakaran serbuk. Sung dkk mengungkapkan bahwa terjadi pengurangan gas NO<sub>x</sub> ketika biomassa dibakar dengan batubara (Sung dkk., 2016).

Selain penelitian polutan gas yang dihasilkan dari proses *co-firing*, ada banyak penelitian mengenai logam jejak dari proses *co-firing*. Seperti penelitian yang dilakukan oleh (Kalembkiewicz dan Chmielarz, 2013) mengungkapkan

bahwa *co-firing* batubara dan biomassa dapat meningkatkan penguapan abu dengan mengurangi mobilitas Pb, Cd dan Zn. Masalah pembentukan terak abu seperti *slagging* dan *fouling* merupakan tantangan penerapan *co-firing* karena dapat mengurangi kualitas pembakaran dan dapat menyebabkan kegagalan operasi. Kupka dkk telah melakukan penyelidikan mengenai pengendapan terak selama *co-firing* batubara dan biomassa (serbuk gergaji, *sewage sludge* dan *refuse derived fuel*). Dari 3 jenis biomassa memiliki karakteristik berbeda dari hasil morfologi susunan endapan (Kupka dkk., 2008). Ini disebabkan kandungan kimia abu yang berbeda dari setiap jenis bahan bakar. Oleh karena itu, perlu adanya analisis komposisi kimia abu untuk mengetahui kandungan dan potensi pembentukan *slagging* dan *fouling*. Madhiyanon dkk (Madhiyanon dkk., 2012) telah melakukan penelitian terkait pembakaran tunggal tandan kosong kelapa sawit menggunakan sistem pembakaran stoker skala pilot. Hasil penelitiannya memberikan informasi bahwa kandungan kimia abu tandan kosong kelapa sawit didominasi logam alkali dan hasil eksperimen pembentukan *slagging* menunjukkan pembakaran tandan kosong kelapa sawit secara tunggal menunjukkan pertumbuhan endapan yang cepat pada probe sehingga memperlambat proses perpindahan panas pada dinding probe. Penyerapan panas probe berkurang 70% dari nilai awal pada periode 19 jam.

Selain perlu adanya penelitian terkait efisiensi pembakaran, emisi dan pembentukan terak, penggunaan TKKS memiliki sifat fisik dan kimia yang merugikan proses pembakaran yaitu biodegradabilitas tinggi, kadar air tinggi, densitas energi rendah, higroskopis tinggi, dan *grindability* rendah (Haryanto dkk., 2021)(Iryani dkk., 2019)(Amrul dkk., 2018)(Amrul dkk., 2019). Untuk mengatasi masalah ini dapat digunakan metode torefaksi (Apriyanto dkk., 2018). Torefaksi

dipercaya dapat membantu untuk mengurangi masalah terkait dengan kualitas bahan bakar biomassa seperti kandungan karbon, nilai kalor, higroskopis dan *grindability* (Haryanto dkk., 2021)(Amrul dkk., 2018).

Berdasarkan data-data penelitian diatas dan beberapa referensi, belum ada penelitian terkait *co-firing* tandan kosong kelapa sawit yang sudah melalui proses torefaksi pada sistem pembakaran serbuk. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki pembakaran bersama batubara sub-bituminous B (BB-SBB) dan tandan kosong kelapa sawit yang telah ditorefaksi (TKKS-TRF) pada ruang bakar serbuk (*Pulverized Coal*) skala pilot. Pembakaran serbuk dipilih karena pembakaran dengan mereduksi ukuran sekecil mungkin membuat kenaikan temperatur ruang bakar semakin tinggi (Amrul. dkk., 2022) dan menjadi salah satu teknologi yang banyak diterapkan dalam dunia industri. Analisis termogravimetri dilakukan untuk mengetahui perilaku pembakaran bersama BB-SBB dan TKK-TRF. Efisiensi pembakaran dan pembentukan emisi polutan dengan beberapa variasi penambahan TKKS tertorefaksi dan *air fuel ratio* (AFR) juga diamati. Terakhir, penelitian ini juga dilakukan analisis potensi pembentukan *slagging* pada proses pembakaran bersama BB-SBB dan TKKS-TRF. Hasil kesimpulan penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih dalam dunia penelitian dan referensi teoritik untuk pembakaran bersama BB-SBB yang merupakan jenis batubara terbanyak di Indonesia dan TKKS dalam aplikasi industri, sehingga tidak perlu investasi untuk pembangunan unit baru dan dapat mengurangi penggunaan batubara dan dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka penelitian mengidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku termogravimetri pembakaran *co-firing* BB-SBB dan TKKS-TRF.
2. Bagaimana perilaku efisiensi dan pembentukan gas CO, CO<sub>2</sub> pada *single firing* BB-SBB, TKKS-TRF dan *co-firing* BB-SBB dengan TKKS-TRF pada sistem pembakaran serbuk (*pulverized coal*).
3. Bagaimana perilaku pembentukan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> pada *co-firing* BB-SBB dan TKKS-TRF pada sistem pembakaran serbuk (*pulverized coal*).
4. Bagaimana kecenderungan pembentukan *slagging* pada *co-firing* BB-SBB dan TKKS-TRF pada sistem pembakaran serbuk.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Dari latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka penelitian ini akan memfokuskan kegiatan dengan tujuan:

1. Menentukan pengaruh persentase TKKS-TRF dalam sistem *co-firing* terhadap perilaku termogravimetri;
2. Menentukan pengaruh persentase TKKS-TRF dalam sistem *co-firing* dan pengaruh variasi *Air Fuel Ratio (AFR)* terhadap efisiensi pembakaran pada sistem pembakaran serbuk (*pulverized coal*);
3. Menentukan pengaruh persentase TKKS-TRF dalam sistem *co-firing* dan pengaruh variasi *Air Fuel Ratio (AFR)* terhadap pembentukan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> pembakaran serbuk (*pulverized coal*);

4. Menentukan pengaruh persentase TKKS-TRF dalam sistem *co-firing* terhadap potensi kecenderungan pembentukan *slagging*.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Kajian pada penelitian ini memfokuskan terhadap persentase campuran bahan bakar tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi dengan batubara pada *co-firing* menggunakan tungku pembakaran serbuk. Beberapa batasan pada kajian ini sebagai berikut:

1. Menggunakan bahan baku biomassa TKKS hasil torefaksi dengan kondisi temperatur  $275^{\circ}\text{C}$  waktu tinggal 30 menit dengan menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket*;
2. Jenis batubara yang digunakan batubara sub-bituminous B;
3. *Co-firing* menggunakan sistem pembakaran serbuk (*pulverized combustion*);
4. Laju pengumpanan bahan bakar 25 kg/jam;
5. Ukuran partikel bahan bakar 200 mesh;
6. Tidak melakukan analisis *heat lose* di area dinding ruang bakar;
7. Analisis potensi pembentukan *slagging* dan *fouling* menggunakan indeks  $R_{B/A}$ ,  $R_s$ ,  $S_r$ , AI dan AFI.

#### **1.5 Sistematika Penulisan Laporan**

Adapun sistematis penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### **BAB I: PENDAHULUAN**

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

##### **BAB II: TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini memuat teori yang berkaitan dengan penelitian.

### BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

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

### BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

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

### BAB V: SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran-saran yang ingin di sampaikan dari penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

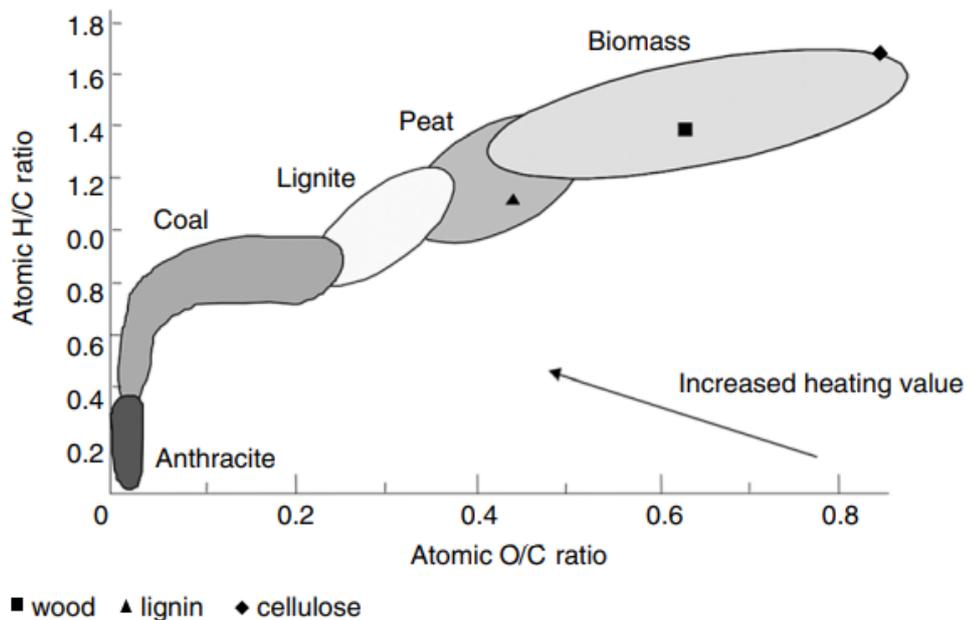
### LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan, perhitungan laporan penelitian dan hasil uji laboratorium

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat merupakan suatu padatan yang mengandung banyak ikatan karbon (C) dengan hidrogen (H) sehingga apabila bereaksi dengan oksigen pada temperatur yang cukup akan terjadi proses pembakaran dan menghasilkan energi dalam bentuk panas. Selain ikatan karbon (C) dengan hidrogen (H), bahan bakar padat juga mengandung ikatan kimia dalam bentuk C dengan O (Basu, 2010). Rasio ikatan atom H:C dan rasio ikatan atom O:C yang membedakan kualitas antara bahan bakar padat (Koppejan & Loo, 2007)(Wahyudi dkk., 2020) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Rasio ikatan atom bahan bakar padat (Basu, 2010).

Atom rasio O/C dalam bahan semakin menurun berkorelasi dengan meningkatnya maka nilai kalor dan ketika rasio atom H:C meningkat dalam bahan bakar maka nilai kalor efektifnya akan menurun (Basu, 2010). Artinya kandungan atom H dan atom O keberadaannya akan merugikan kualitas bahan bakar (Koppejan & Loo, 2007). Dalam penelitian ini akan difokuskan pada bahan bakar padat batubara dan biomassa limbah kelapa sawit. Secara rasio atom, diatas kertas batubara mempunyai nilai kalor lebih tinggi dibandingkan biomassa (Wahyudi dkk., 2020).

Biomassa merupakan tumbuhan yang masih mengandung banyak kandungan O dalam bentuk kandungan air walaupun sudah dalam kondisi kering. Kehadiran atom O berbanding terbalik dengan konsentrasi karbon seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 (Bruce G. Miller and Tillman, 2008).

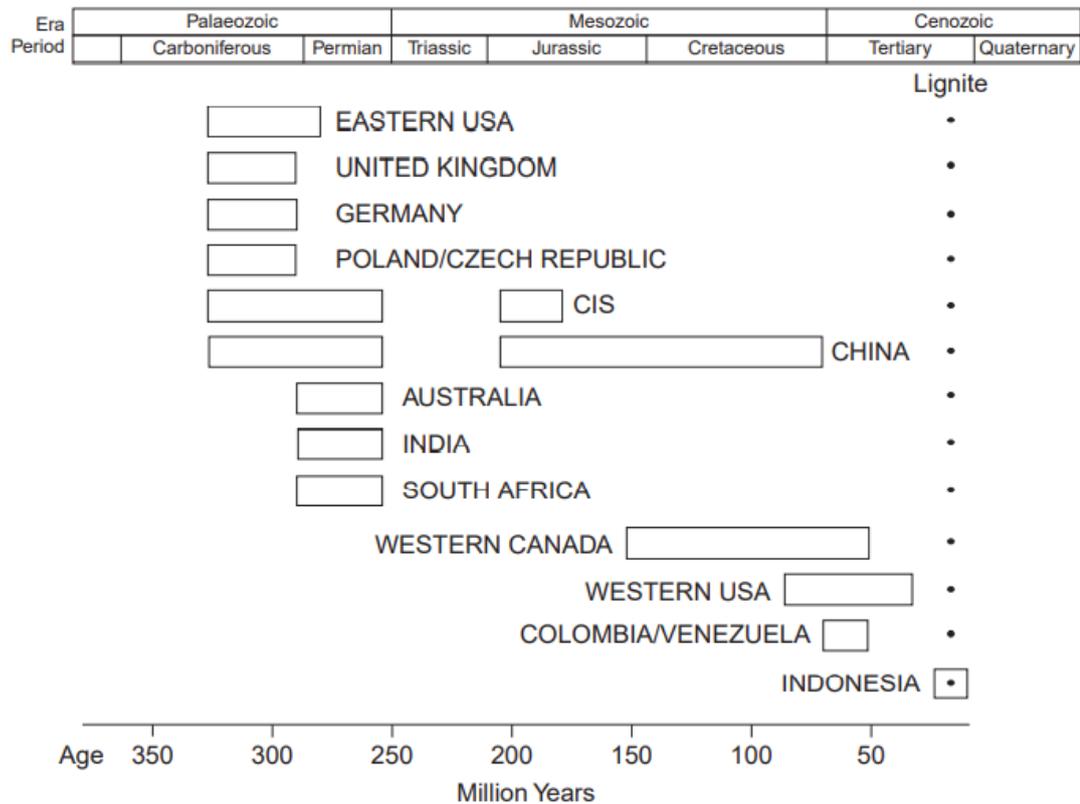
Tabel 2.1 Kandungan Oksigen menurut Gugus Fungsi (%)

<i>Carbon Content (%)</i>	<i>Oxygen Content by Functional Group (wt %)</i>				
	<i>O<sub>COOH</sub></i>	<i>O<sub>OCH<sub>3</sub></sub></i>	<i>O<sub>OH</sub></i>	<i>O<sub>C=O</sub></i>	<i>O<sub>NR</sub></i>
65.5	8.0	1.1	7.2	1.9	9.6
70.5	5.1	0.4	7.8	1.1	8.2
75.5	0.6	0.3	7.5	1.4	6.4
81.5	0.3	0.0	6.1	0.5	4.2
85.5	0.05	0.0	5.6	0.5	1.75
87.0	0.0	0.0	3.2	0.6	1.3
88.6	0.0	0.0	1.9	0.25	0.85
90.3	0.0	0.0	0.5	0.2	2.2

### 2.1.1 Batu Bara

Batubara adalah batuan sedimen yang terdiri dari bahan organik dan anorganik. Kandungan organik batubara terdiri dari karbon, hidrogen, oksigen dan sedikit sulfur, sedangkan kandungan anorganik batubara terdiri dari beragam

senyawa logam sebagai pembentuk abu (EIA, 2005). Batubara terbentuk dari akumulasi sisa-sisa vegetasi makhluk hidup yang telah mengalami perubahan fisik dan kimia selama ratusan juta tahun. Perubahan ini meliputi: pembusukan vegetasi, pengendapan, penguburan oleh sedimentasi, pemadatan, dan transformasi sampai menjadi batubara saat ini.



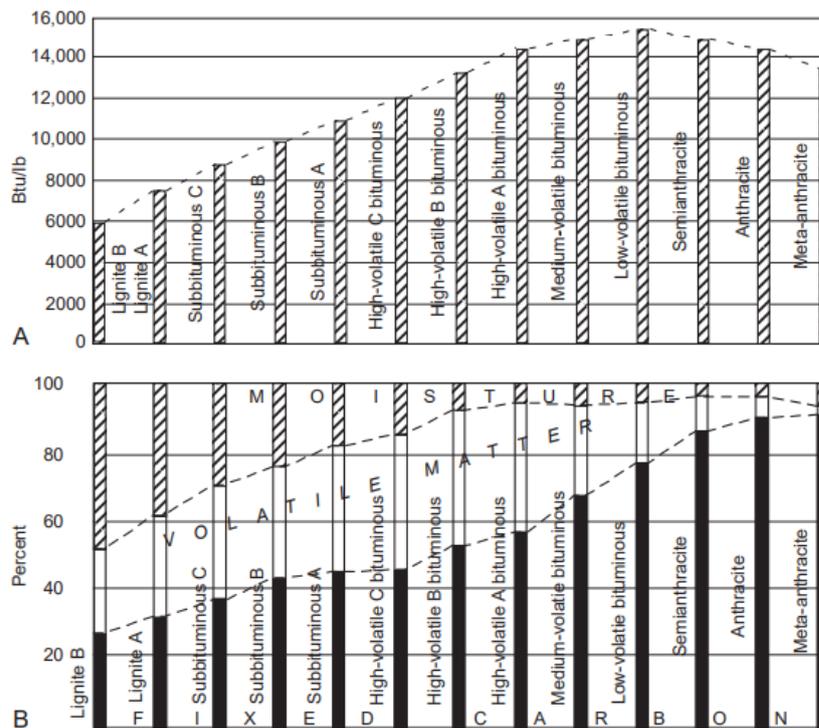
Gambar 2.2. Usia geologis batubara di dunia (Bruce G. Miller and Tillman, 2008).

Jenis vegetasi penyusun, kondisi pembentukan, lingkungan pengendapan, dan pergerakan kerak bumi merupakan faktor-faktor dalam menentukan sifat dan kualitas batubara. Kondisi ini yang menyebabkan kualitas batubara setiap lokasi berbeda-beda. Selain dari vegetasi penyusun dan kondisi iklim, lama pembentukan juga menjadi faktor penentu kualitas batubara (Gambar 2.2). Untuk mencapai kandungan karbon tinggi dibutuhkan waktu 300-350 juta tahun seperti ditunjukkan

pada Gambar 2.2. Pembentukan batubara di Indonesia masih dalam angka 50 juta tahun lalu. Ini salah satu alasan yang mendasari kualitas batubara di Indonesia tergolong medium.

### 2.1.2 Grade Batubara

Proses geokimia yang mengubah sisa-sisa tanaman menjadi batubara disebut *coalification*. *Coalification* dapat digambarkan secara geokimia terdiri dari tiga proses: degradasi mikrobiologi selulosa bahan tanaman, konversi lignin tanaman menjadi humus dan kondensasi zat humat ini menjadi molekul batubara yang lebih besar (Orem & Finkelman, 2003).



Gambar 2.3. (a) grade batubara berdasarkan nilai kalor (B) grade batubara berdasarkan komposisi penyusun (Bruce G. Miller and Tillman, 2008).

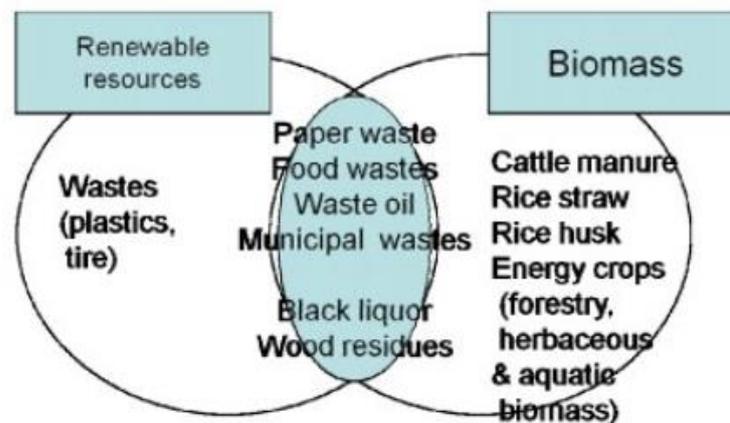
Proses *coalification* dipengaruhi variasi komposisi kimia dari tanaman, yang mana vegetasi dari berbagai periode geologi berbeda secara biologis dan kimiawi sehingga menyebabkan batubara mempunyai *grade* tertentu. *Grade* batubara dapat dilihat dari komposisi atom penyusun dan nilai kalor yang terkandung di dalamnya yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Dari Gambar 2.3 memperlihatkan hubungan antara nilai kalor dengan persentase *fixed carbon*, *volatile matter* dan *moisture content*. Untuk memperoleh nilai kalor yang tinggi, batubara harus mempunyai banyak kandungan *fixed carbon*, sedikit *volatile matter* dan sedikit *moisture content*. *Moisture content* merupakan kandungan bahan bakar yang dihindari karena sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran.

Secara umum, batubara dibagi kedalam lima kelas yaitu, antrasit, bituminous, sub-bituminous, lignite dan gambut.

- a. Antrasit adalah kelas batubara tertinggi, dengan warna hitam metalik, mengandung  $\pm 90\%$  unsur karbon (C),  $\pm 5\%$  *volatile matter* dengan kadar air kurang dari 5%;
- b. Bituminous mengandung 68 - 86% unsur karbon (C) dan berkadar air 8 sampai 10% dari beratnya.
- c. Sub-bituminous mengandung 38%-43% unsur karbon (C), 40-50% *volatile matter* dengan kadar air 20%-30% dan banyak air, oleh karenanya menjadi pembakaran yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminous.
- d. Lignite atau batubara coklat adalah batubara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya.
- e. Gambut, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah.

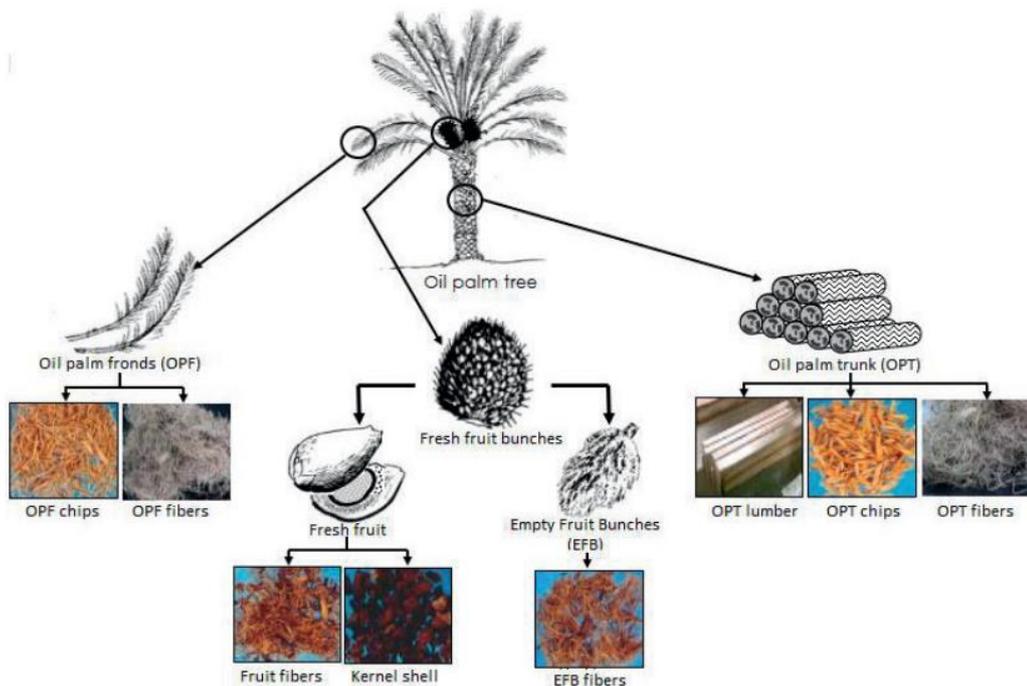
### 2.1.3 Biomassa Kelapa Sawit

Biomassa merupakan material biologis yang berasal dari tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai sumber energi. Biomassa seringkali disebut dengan *bioresource* atau sumber daya hayati dan termasuk energi terbarukan karena dapat disimpan, diganti, melimpah, dan merupakan karbon netral (Basu, 2010). Material-material yang dapat dikatakan sebagai biomassa sangat variatif mulai dari tanaman, pepohonan, rumput, limbah hutan, residu pertanian, residu hewan, residu manusia, hingga sampah hasil sisa aktivitas masyarakat (sampah padat perkotaan) seperti terlihat pada Gambar 2.4. Material biomassa mempunyai energi tersimpan dalam bentuk ikatan kimia antara molekul karbon, hidrogen dan molekul oksigen. Ketika ikatan kimia massa dirusak, massa akan melepaskan energi kimia dalam bentuk gas, cair, dan padat sesuai dengan perlakuan yang diberikan (Yang dkk., 2007)(Mckendry, 2002). Gas alternatif yang dihasilkan dari biomassa berupa gas CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, sedangkan untuk *bio-fuel* berupa ethanol, bio-diesel, methanol, *vegetable oil*, dan *pyrolysis oil*. Adapun hasil biomassa yang berbentuk padatan yaitu berupa *charcoal* dan terofaksi biomassa (Basu, 2010).



Gambar 2.4. Klasifikasi biomassa.

Kelapa sawit merupakan biomassa yang paling banyak dibudidayakan di Indonesia terutama di Sumatra dan Kalimantan. Total luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia yaitu 14,456 juta hektare (BPS, 2020). Dengan asumsi produksi tandan buah segar 20 ton/hektar setiap tahun maka produksi tandan buah segar diperkirakan 289.12 juta ton. Ini menempatkan Indonesia menjadi penghasil sawit terbesar di dunia. Dengan produksi ini, kelapa sawit menjadi industri penting dalam rencana transformasi energi nasional dari energi tidak dapat diperbarui (fosil) ke energi terbarukan (*renewable energy*) (GAPKI, 2017). Selain tandan buah segar, ada beberapa produk sampingan kelapa sawit yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Pemanfaatan produk samping kelapa sawit (Dungani dkk., 2018).

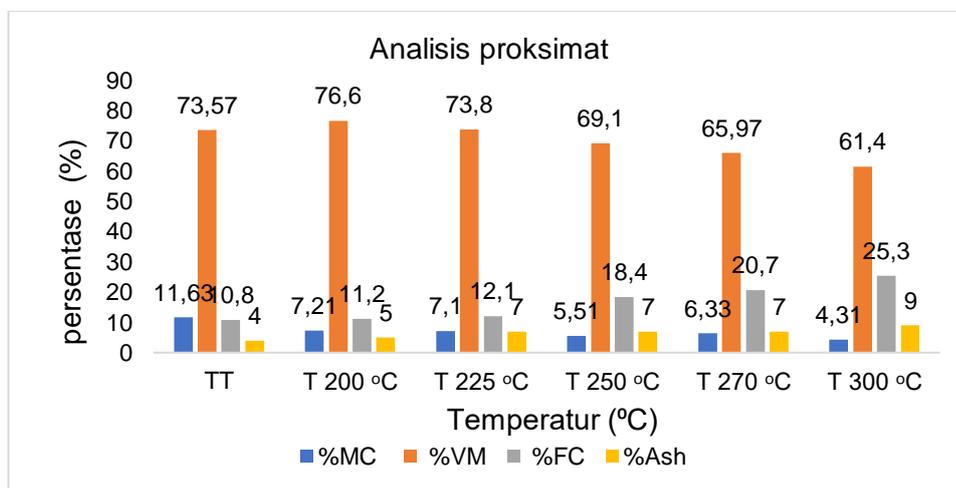
Umumnya hingga saat ini hanya 10% dari penggunaan residu biomassa kelapa sawit yang sudah dimanfaatkan. Padahal limbah kelapa sawit yang memiliki kandungan lignoselulosa dapat dijadikan sumber *bioenergy* (Dungani dkk., 2018).

(Dungani dkk., 2018) juga menyelidiki komposisi kimia residu kelapa sawit yang tertuang dalam Tabel 2.2

Tabel 2.2 Komposisi kimia residu kelapa sawit

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

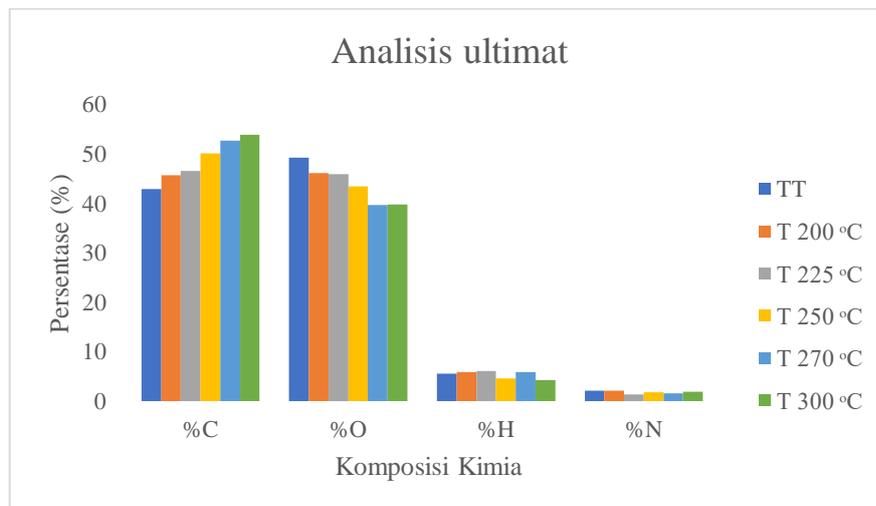
Sedangkan untuk analisis kandungan untuk menentukan potensi energi tandan kosong kelapa sawit. (Wahyudi dkk., 2020) telah melakukan analisis proksimat pada sampel tandan kosong kelapa sawit mentah dengan kondisi *dry basis* dan sampel hasil torefaksi diperoleh data seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Grafik analisis proksimat TKKS.

TKKS mentah masih memiliki kandungan air (*inheren moisture content*) 11.63%. Sedangkan setelah mengalami perlakuan torefaksi, *moisture content* mengalami penurunan karena sebagian air sudah menguap saat proses torefaksi

berlangsung. Dari gambar grafik TKKS torefaksi menunjukkan peningkatan *fix carbon* dan terjadi penurunan *volatile matter*. Penurunan *volatile matter* terjadi saat torefaksi yang mana *volatile matter* akan semakin menguap ketika temperatur torefaksi dinaikkan. (Wahyudi dkk., 2020) juga melakukan analisis ultimat pada sampel mentah dan sampel hasil torefaksi diperoleh data seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.7

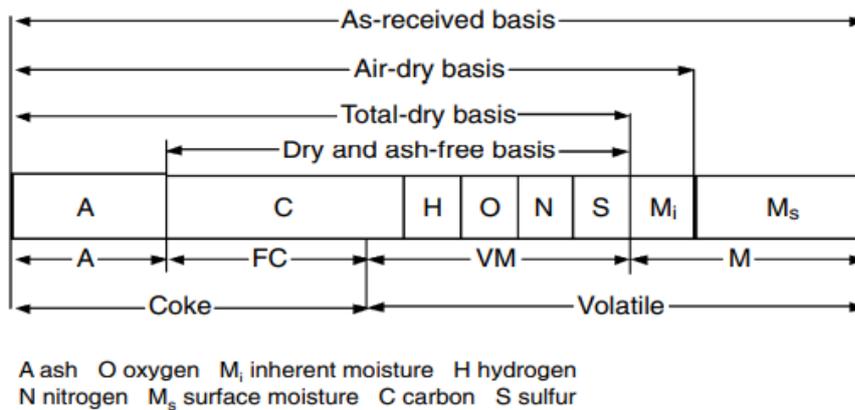


Gambar 2.7. Grafik analisis ultimat TKKS.

Dari analisis ultimat, untuk kandungan C semakin tinggi dan kandungan O semakin rendah dengan kenaikan temperatur. Seperti dijelaskan sebelumnya, kehadiran C sangat diperlukan untuk meningkatkan nilai kalor dan kehadiran O sangat mempengaruhi pengurangan nilai kalor.

## 2.2 Basis Komposisi Biomassa

Komposisi bahan bakar sering dinyatakan dalam basis yang berbeda tergantung pada situasinya. Empat basis analisis biomassa ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Basu, 2010).



Gambar 2.8. Basis komposisi biomassa.

### 2.2.1 As Received Basis

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

### 2.2.2 Air Dry Basis

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

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

M<sub>a</sub> adalah massa *surface moisture* yang dihilangkan dari 100 kg bahan bakar lembap setelah dikeringkan di udara.

### 2.2.3 Total Dry Basis

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

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

M adalah *total moisture* di dalam bahan bakar.

### 2.2.4 Dry and Ash-free

Komposisi *Dry and ash-free* (DAF) yaitu komposisi bahan bakar dengan menghilangkan kandungan abu dan *total moisture*. Mengikuti contoh yang disebutkan di atas, persentase karbon pada basis DAF ,  $C_{DAF}$ , dapat ditemukan.

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

(100 –M – ASH) adalah total biomassa tanpa kandungan abu dan *total moisture*.

## 2.3 Karakteristik Bahan Bakar Padat

Metode penentuan karakteristik standar batubara telah dikembangkan di bawah instansi *American Society for Testing and Materials (ASTM) Committee D-5 on Coal and Coke* yang biasa di sebut metode ASTM (Bruce G. Miller and Tillman, 2008). Dalam menentukan karakteristik bahan bakar padat, di Indonesia menggunakan acuan ASTM meliputi beberapa pengujian sebagai berikut:

### 2.3.1 Analisis Proksimat

Uji proksimat dilakukan untuk memperoleh data komposisi batubara meliputi persentase kandungan air (*moisture content*), persentase zat mudah terbakar

(*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), dan persentase kandungan abu (*ash content*)(Thaim, Abdul Rasid, dkk., 2019). Persamaan 2.4 merupakan penjumlahan kandungan uji ultimat *as received basis* (Basu, 2010).

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

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

#### 2.3.1.1 Kandungan Air (*moisture content*)

Pengukuran kadar air terbagi menjadi 2 yaitu *free moisture* (FM) dan *inherent moisture* (IM). Adapun jumlah dari keduanya dinamakan dengan *total moisture* (TM). Kadar kelembaban mempengaruhi jumlah pemakaian udara primer. Bahan bakar padat dengan kelembaban tinggi akan membutuhkan udara primer lebih banyak untuk mengeringkan batubara.

#### 2.3.1.2 Kandungan zat mudah terbakar (*volatil matter*)

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

### 2.3.1.3 Karbon Tetap (*Fix Carbon*)

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

### 2.3.1.4 Kandungan abu (*ash content*)

Kandungan abu akan terbawa bersama gas pembakaran melalui ruang bakar dan daerah konversi dalam bentuk abu terbang (*fly ash*) yang jumlahnya mencapai 80 persen dan abu dasar sebanyak 20 persen. Semakin tinggi kadar abu, secara umum akan mempengaruhi tingkat pengotoran (*fouling*), keausan, dan korosi peralatan yang dilalui.

## 2.3.2 Analisis Ultimat

Uji ultimat ditentukan menggunakan acuan standar ASTM D 5373. Analisis ultimat dilakukan untuk mengetahui nilai komponen kimia yang terkandung di dalam sampel bahan bakar padat dengan menggunakan *instrument elemental analyzer*. Komposisi elemen kimia atau nilai ultimat yaitu nilai carbon (C), hydrogen (H), dan oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S) (Arias dkk. 2008). Untuk menentukan persentase oksigen cukup rumit, maka persentase oksigen ditentukan melalui pengurangan 100% dikurang dari penjumlahan persentase total karbon, hidrogen, nitrogen dan belerang (Basu, 2010).

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

Namun, teknik ini mengakumulasikan semua kesalahan dalam menentukan unsur-unsur lain ke dalam nilai yang dihitung untuk oksigen. Selain menentukan

kandungan diatas, analisis ultimat dapat digunakan untuk perhitungan nilai kalor (HHV & LHV) dan digunakan sebagai dasar perhitungan pembakaran meliputi penentuan laju umpan batubara dan kebutuhan udara pembakaran dunia (Miller & Tillman, 2008). Tabel 2.3 menunjukkan hasil dari hasil analisis proksimat dan ultimat batubara dan TKKS (Wahyudi dkk., 2020).

Tabel 2.3 Analisis proksimat dan ultimat

Sampel	Analisis Ultimat [wt%]					Analisis Proksimat [wt%]		
	N	C	H	O	S	Abu	VM	FC
TKKS	1.58	52.78	5.89	39.75	-	7	65.97	20.7
Batubara	1.3	58.8	3.8	12.2	0.3	4	30.5	45.9

Data analisis proksimat dan ultimat sampel batubara sub-bituminous B diperoleh dari data sekunder milik PT. Bukit Asam (Persero), sedangkan untuk data analisis proksimat dan ultimat sampel tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi diperoleh dari data sekunder penelitian Wahyudi dkk (Wahyudi dkk., 2020).

### 2.3.3 Nilai Kalor

Nilai kalor HHV dan LHV dari variasi kedua bahan bakar BB-SBB dan TKKS-TRF dapat dilihat pada Tabel 2.4. Nilai kalor ini diperoleh menggunakan perhitungan empiris melalui persamaan 2.6 dan persamaan 2.7 (Maskur dkk., 2021).

$$HHV = 14544 C + 62028 (H_2 - (O_2/8)) + 4050 S \text{ (Btu/lb)} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$LHV = HHV - 1049,7 (H_2 \times 8,937 + M) + 264,4 H_2 \text{ (Btu/lb)} \dots\dots\dots(2.7)$$

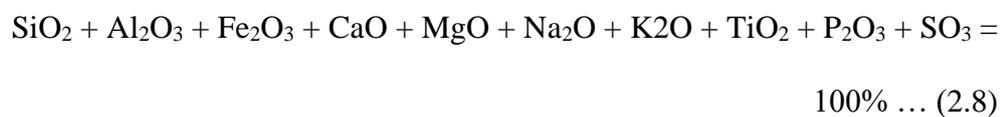
Dengan data-data dari hasil analisis ultimat, diperoleh nilai kalor seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4:

Tabel 2.4 Nilai kalor sampel (Wahyudi dkk., 2020)

Sampel	HHV [kJ/kg]	LHV [kJ/kg]
TKKS 100%	21083.97	20029.01
Batubara 100%	23562.38	23232.42
Batubara 90%	23314.54	22912.08
Batubara 80%	23066.69	22591.74
Batubara 70%	22818.86	22271.39

#### 2.3.4 Komposisi Kimia Abu

Dari hasil analisis proksimat, diperoleh persentase abu dalam bahan bakar. Abu ini merupakan *inorganic constituen* yang merugikan dalam proses pembakaran terutama dalam proses terjadinya deposit, abrasi dan erosi. Sehingga perlu untuk mengetahui komposisi abu dalam setiap bahan bakar untuk memperkirakan karakteristik abu batubara dan *slag*, serta menghitung berbagai parameter korelasinya. Abu batubara hampir seluruhnya terdiri dari oksida logam. Komposisinya bervariasi dalam rentang yang luas, dan tidak ada analisis abu yang tipikal. Analisis kimiawi abu batubara dinyatakan sebagai persen massa dari setiap oksida ekuivalen dan umumnya dinyatakan sebagai:



Untuk kandungan kimia abu tandan kosong kelapa sawit dari himpunan beberapa penelitian (Hariana dkk., 2020) sebagai berikut:

Tabel 2.5 Komposisi kimia abu TKKS

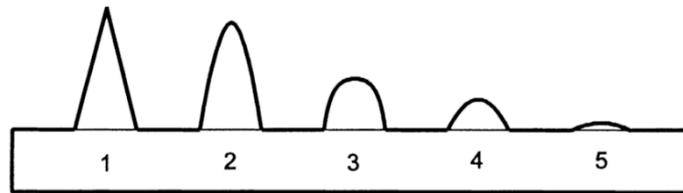
Parameter	Jeong, 2019	Lahijani, 2011	Nigduangde, 2016	Madiyanon, 2013	Konsombon, 2011	Rata- rata
Kandungan Abu (%)	2,77	4,50	2,90	5,50	4,60	4,05
SiO <sub>2</sub>	39,30	27,00	26,21	12,12	12,12	23,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,22	0,97	3,11	0,26	0,26	2,76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,82	3,00	3,21	0,00	6,45	8,90
CaO	4,52	8,00	12,54	9,65	9,65	8,87
MgO	3,09	4,80	3,24	1,90	1,90	2,99
TiO <sub>2</sub>	0,45	0,08	0,00	0,00	0,81	0,27
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,55	0,36	0,09	0,09	0,22
K <sub>2</sub> O	5,33	44,00	47,21	55,48	55,48	41,50
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,00	0,11	0,00	0,00	0,35	0,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,01	3,60	1,21	3,58	3,58	3,00
SO <sub>3</sub>	3,26	2,70	0,00	1,66	1,66	1,86
Tidak terdeteksi	0,00	5,19	2,91	15,26	7,65	6,20

### 2.3.5 Ash Fusion Temperature (AFT)

Uji ini difungsikan untuk mengetahui titik reduksi dan oksidasi dari kandungan abu. Hasil uji ini penting sebagai dasar untuk mengetahui prediksi *slagging* dan *fouling* pada kondisi temperatur berapa akan terbentuk (Chen dkk., 2021)(Monika & Sulistyohadi, 2019), sehingga membantu di dalam menentukan temperatur operasi selama pembakaran batubara di dalam tungku boiler.

Uji ini dibagi menjadi 2 yaitu uji AFT oksidasi dan AFT reduksi. Metode uji menggunakan acuan standard ASTM D1857 Dengan menggunakan AF700 by Leco, perubahan temperatur pelelehan abu batubara dapat diukur dengan akurat. Cara pengukurannya dapat dilakukan berdasarkan kondisi reduksi maupun oksidasi. Untuk kondisi reduksi gas H<sub>2</sub> atau CO<sub>2</sub> dialirkan selama proses pengukuran sedangkan untuk kondisi oksidasi digunakan gas oksigen. Pengukuran temperatur leleh abu dilakukan dengan memanaskan abu batubara yang dibentuk

kerucut di dalam suatu tungku. Gambar 2.9 menunjukkan kondisi temperatur fusi abu (AFT) yang memperlihatkan tahapan pengamatan yaitu:



1. *Cone* sebelum dipanaskan;
2. *Defortmation temperature* (DT);
3. *Softening temperature* (ST);
4. *Hemispherical temperatute* (HT);
5. *Flow temperature* (FT);

Gambar 2.9. Bentuk fusi abu (Lachman dkk., 2021).

Untuk mempersiapkan analisis AFT, larutan dekstrin ditambahkan ke dalam abu batubara (membuat adonan) dan dibentuk dalam cetakan untuk membuat piramida segitiga (*cone*) dengan tinggi 0,75 inci dan piramida dasar 0,25 inci. Campuran dekstrin dan abu batubara dimasukkan ke dalam tanur listrik dengan suhu 699-743°C. Suhu deformasi awal (IT) adalah suhu awal pembentukan. Itu terjadi ketika puncak piramida mulai berubah membentuk piramida kedua seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Biasanya, suhu pelunakan (ST) mengarah ke suhu fusi. Temperatur hemisfer (HT) adalah temperatur di mana segitiga dibentuk menjadi gumpalan hemisfer dan tingginya sama dengan setengah dari lebarnya. Sedangkan temperatur fluida (FT) adalah temperatur dimana segitiga abu telah menyatu dengan batas maksimal 0,0625 inci (Chen dkk., 2021).

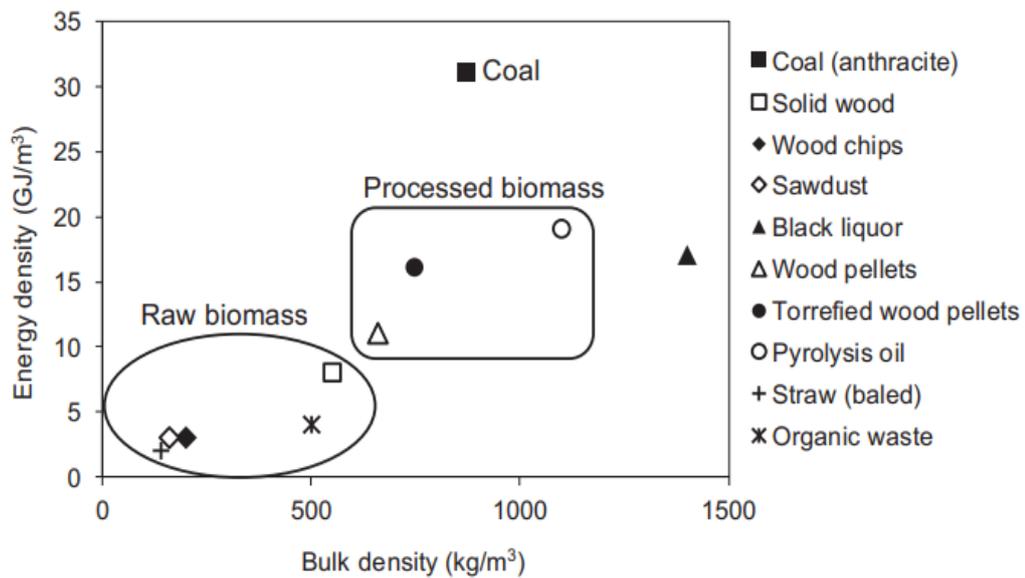
### 2.3.6 *Hardgrove Grindability index* (HGI)

*Hardgrove Grindability index* (HGI) dilakukan untuk mengetahui suatu bilangan yang dapat menunjukkan daya gerinda batubara menjadi bahan bakar

serbuk. Makin kecil bilangannya, makin keras keadaan batubara nya. Pengujian ini akan berdampak pada proses pereduksian partikel (Neikov, 2019). Cara pengukuran *Hardgrove Grindability index* yaitu dengan cara menimbang sampel sebanyak 50 gram (+ 0,02 gram). Masukkan sampel ke mesin HGI, putar selama 60 rpm. Setelah selesai tempatkan sampel diatas ayakan No. 200, kemudian dilakukan pengayakan. Pengujian ini menggunakan acuan standard ASTM D406/D409-12.

### 2.3.7 Densitas Energi

Densitas adalah parameter yang digunakan pengukuran massa setiap satuan volume ( $\text{kg/m}^3$ ). Densitas bergantung pada besar massa dan volume benda. Semakin tinggi densitas suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya. Mengacu pada definisi densitas, maka densitas energi bisa disimpulkan merupakan parameter yang digunakan untuk pengukuran energi per satuan volume. Berbeda dengan nilai kalor yang merupakan satuan energi per satuan massa. Apabila bahan bakar memiliki densitas energi yang tinggi, maka semakin besar juga nilai kalor yang dapat dibangkitkan. Dalam kasus perbandingan densitas energi batubara dibandingkan dengan densitas energi bahan bakar lainnya diperlihatkan pada Gambar 2.10. Biomassa mentah memiliki densitas energi yang rendah karena memiliki banyak kandungan yang membuat efek negatif pada proses pembakaran. Salah satu cara meningkatkan densitas energi salah satunya menggunakan konversi termokimia torefaksi. Torefaksi meningkatkan densitas energi biomassa dengan mengurangi kandungan oksigennya yang mengarah ke biomassa padat produk dengan nilai kalor mendekati batubara (Thaim, Rasid, dkk., 2019).



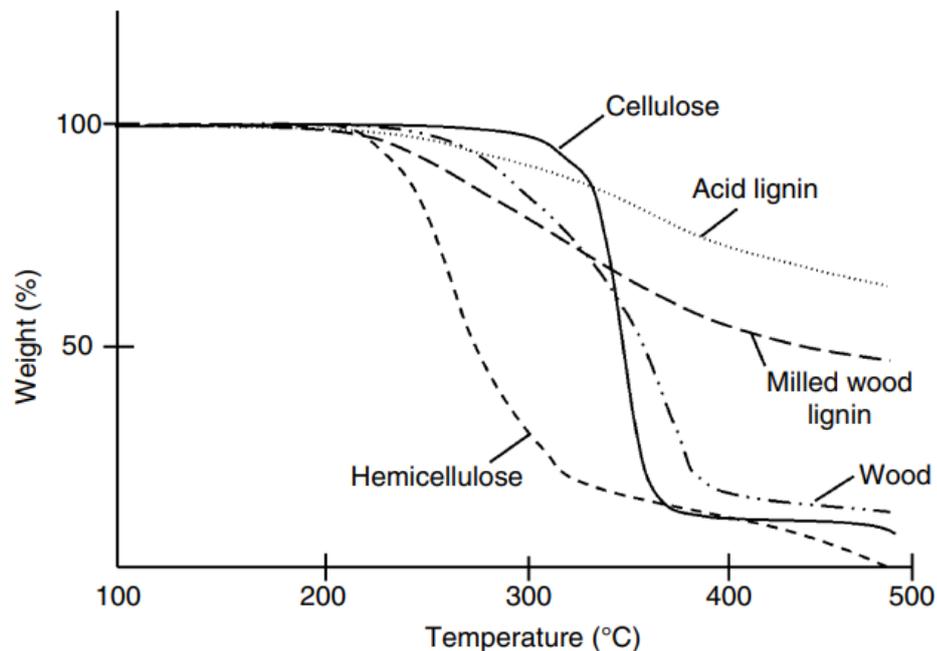
Gambar 2.10. Densitas energi bahan bakar padat (Gil & Rubiera, 2018).

## 2.4 Torefaksi

Torefaksi merupakan proses pirolisis ringan pada temperatur 200-300°C tanpa kehadiran oksigen, dimana produk utama yang dihasilkan adalah padatan yang kaya akan *bio-char* (Amrul dkk., 2019)(Amrul dkk., 2018)(Basu, 2010)(Haryanto dkk., 2021). Dengan melakukan *pretreatment* tandan kosong kelapa sawit melalui proses torefaksi akan meningkatkan densitas energinya, mengurangi rasio atom O terhadap C, mengurangi sifat higroskopis dan meningkatkan *grindability* (Iryani dkk., 2019)(Wahyudi dkk., 2020). Proses torefaksi menghilangkan H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>. Akibatnya hilangnya H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub> akan menurunkan rasio O/C dan H/C. Dalam TKKS mentah, kandungan oksigen yang tinggi mendorong oksidasi berlebih selama gasifikasi, meningkatkan kerugian proses termodinamika (Basu, 2010). Torefaksi dapat mengurangi kehilangan ini dengan mengurangi oksigen dalam TKKS. Torefaksi juga meningkatkan kandungan karbon relatif dari biomassa. Untuk menentukan karakteristik TKKS

tertorefaksi yaitu bergantung pada temperatur, waktu tinggal dan material penyusun bahan baku torefaksi (Wahyudi dkk., 2020).

Pada proses degradasi termal torefaksi, kehilangan berat biomassa berasal dari dekomposisi konstituen hemiselulosanya pada temperatur 150-280°C, dengan mekanisme proses pirolisis diawali dengan proses dehidrasi atau pengeringan pada suhu 100-180° C kemudian dilanjutkan dengan proses dekomposisi hemiselulosa pada suhu 180-280° C yang sebagian besar di konversikan menjadi CO<sub>2</sub>, dekomposisi selulosa pada 240-340° C. Ketika temperatur dekomposisi >280°C lignin mulai terdekomposisi. Pada range temperatur >280°C sudah memasuki zona pirolisis sampai mencapai 500° C (Yang, 2007). Untuk Penurunan berat selulosa, hemiselulosa, dan lignin selama dekomposisi termal ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Proses dekomposisi kandungan biomassa (Basu, 2010).

## 2.5 Pembakaran Arang (*Char*)

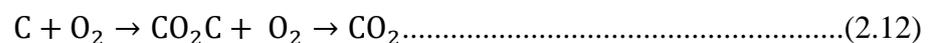
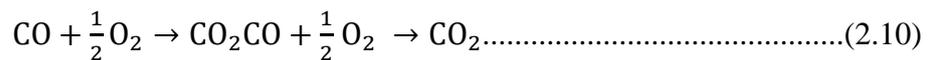
Arang merupakan residu dalam bentuk padatan yang mengandung mayoritas atom C yang dihasilkan dari penghilangan kandungan air dan *volatil matter* dari tumbuhan maupun hewan. Proses penghilangan kandungan air dan *volatil matter* bisa dilakukan melalui konversi termokimia buatan seperti karbonisasi maupun torefaksi (Matali dkk., 2018). Batubara bisa juga dikatakan bahan bakar arang karena merupakan padatan yang kaya kandungan atom C, hanya saja proses pembentukannya melalui proses fisika dan kimia oleh alam selama jutaan tahun. Dibandingkan dengan *raw* biomassa, penelitian menunjukkan bahwa arang memiliki karakteristik pembakaran yang lebih baik, termasuk kadar air dan volatil yang lebih rendah, rasio H/C dan O/C yang lebih rendah, nilai kalor dan kepadatan energi yang lebih tinggi, peningkatan pembakaran kondisi tunak, dan waktu pengapian yang lebih pendek (Bruce G. Miller and Tillman, 2008). Analisis termogravimetri (TGA) adalah alat yang berharga untuk memahami perilaku pembakaran arang yang berasal dari biomassa untuk produksi energi. Termogravimetri juga dapat membantu untuk menilai kompleksitas dekomposisi termal bahan dan sebagai konsekuensinya menyimpulkan kinetika pembakaran (Guo dkk., 2020) (Guo & Zhong, 2018).

### 2.5.1 Kinematika Pembakaran *Char*

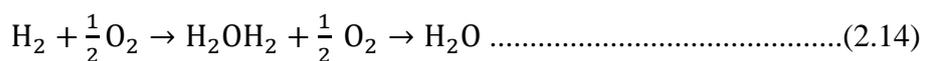
Pembakaran *char* adalah proses yang jauh lebih lambat daripada devolatilisasi, oleh karena itu perlu menentukan waktu untuk pembakaran sempurna dalam tungku. Penelitian terdahulu menginformasikan bahwa pembakaran arang dimulai dengan kemisorpsi oksigen pada situs aktif pada permukaan arang, dan bahwa dekomposisi oksida permukaan yang dihasilkan

terutama menghasilkan CO (Elliott, 1981). Beberapa peneliti berpikir bahwa beberapa CO<sub>2</sub> dapat dilepaskan selama langkah ini juga. CO kemudian dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> di zona batas gas di sekitar partikel arang. Situs reaksi baru terus terpapar saat oksida permukaan terurai. CO<sub>2</sub> kemudian berpindah ke aliran gas atau direduksi menjadi CO jika menabrak arang. Mekanisme reaksi keseluruhan adalah kompleks tetapi pembakaran arang melibatkan setidaknya empat reaksi karbon-oksigen (Elliott, 1981). Secara umum, kinetika reaksi pembakaran *Char* meliputi beberapa tahapan sebagai berikut:

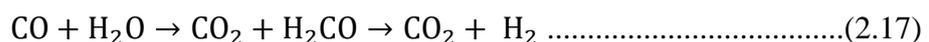
Pembakaran atom C



Untuk reaksi pembakaran selain atom C



Dan kemungkinan disertai reaksi lain



Beberapa kandungan materi mineral dapat menguap selama pembakaran yang akan menyebabkan terjadinya pembentukan deposit, sementara yang lain akan tertinggal di dalam tungku sebagai abu (Zhu dkk., 2019).

### 2.5.2 Densifikasi *Char*

Densifikasi sering diterapkan untuk meningkatkan biaya penyimpanan, penanganan, dan transportasi tetapi juga dan khususnya untuk mencapai efisiensi pembakaran yang baik (Kraiem dkk., 2014). Memang densifikasi mencapai bentuk dan ukuran bahan bakar berpori padat yang seragam dengan peningkatan kepadatan, kekerasan optimal, dan konsentrasi karbon tinggi, yang akan membantu meningkatkan nilai kalor. Selain itu, bahan dapat digunakan baik secara eksklusif atau dicampur dengan substrat lain untuk memperbaiki kualitas bahan bakar padat dan untuk mengoptimalkan proses densifikasi (Kraiem dkk., 2016).

Arang yang diperoleh dari pirolisis biomassa adalah salah satu kandidat yang paling menarik untuk densifikasi karena memiliki *bulk* yang rendah di satu sisi dan nilai kalor yang menarik di sisi lain. Pirolisis, torefaksi, atau karbonisasi dilakukan sebelum pemadatan untuk beberapa jenis biomassa (residu kayu dan herba, tanaman, barang pertanian, kotoran hewan, limbah kota) dan berbagai kegiatan seperti pengolahan makanan dan pengolahan lumpur limbah. Hasil memberikan kualitas bahan bakar yang unggul dibandingkan dengan densifikasi bahan baku (Khiari dkk., 2019). Namun, dalam banyak kasus, densifikasi biomassa hasil pirolisis sulit dilakukan, karena bahan yang diolah mengalami modifikasi struktural dalam serat, kohesivitas, daya alir, dan kadar air (Basu, 2013). Membalikkan urutan

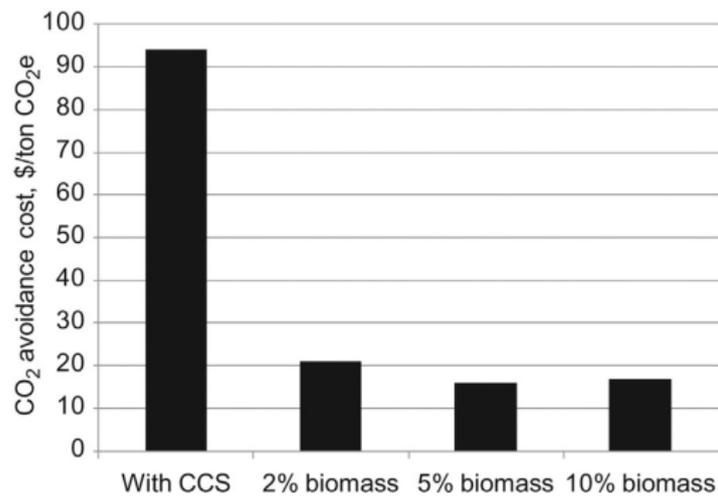
rantai kemudian menjadi solusi cerdas untuk meningkatkan kualitas arang biomassa (Q. Wang dkk., 2017).

## **2.6 *Co-firing***

Pembakaran langsung merupakan pilihan penting untuk konversi energi biomassa dan telah digunakan sejak awal peradaban manusia ketika manusia menemukan api (Chen dkk., 2021). Dalam skala kecil, Pembakaran langsung diaplikasikan sebagai sumber energi utama di daerah pedesaan. Penggunaan biomassa terbesar dalam aplikasi skala kecil seperti alat memasak rumah tangga, dimana biomassa digunakan sebagai kayu bakar. Penggunaan komersial skala besar, meskipun tumbuh terutama untuk sumber panas pengeringan dan produksi listrik, tapi biomassa belum menjadi aplikasi utama. Baru-baru ini, setelah bumi mengalami pemanasan global, motivasi penggunaan biomassa menggantikan bahan bakar fosil di pembangkit listrik tenaga uap, industri semen, dan pembuatan besi semakin berkembang karena diyakini merupakan bahan bakar karbon netral, rasio molar hidrogen-karbon (H/C) biomassa yang tinggi, pembakaran biomassa melepaskan jumlah CO<sub>2</sub> yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar rasio H/C yang lebih rendah (Ndibe dkk., 2015), sehingga dapat mengurangi jejak karbon dari industri-industri tersebut. Karena perbedaan besar dalam sifat pembakaran biomassa dan batubara, sulit untuk mengganti keseluruhan bakar batubara dengan biomassa. Sebagai solusi praktis yang dapat diterima adalah mengganti sebagian konsentrasi bahan bakar fosil dengan biomassa untuk mengurangi tingkat ketidakcocokan yang selanjutnya disebut *co-firing* (Guo & Zhong, 2018).

Minat terhadap *co-firing* biomassa meningkat karena meningkatnya kebutuhan untuk segera mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dari pembangkit

listrik besar. Karena *Co-firing* biomassa terbukti dan lebih murah bisa menjadi solusi jangka pendek terbaik untuk pengurangan GRK di pembangkit listrik tenaga batu bara (Xue dkk., 2020). Sebenarnya studi tentang teknologi *carbon capture storage* (CCS) sedang galak dilakukan dan banyak negara telah mengeluarkan dana besar untuk pabrik percontohan tapi penggunaan komersial skala luas CCS tidak mungkin terjadi dalam waktu singkat. Bahkan jika CCS mengatasi semua masalah ini, biaya pembangkitan listrik akan tetap tinggi. Perbandingan *cost* antara CCS dengan *co-firing* ditunjukkan pada gambar 2.12.



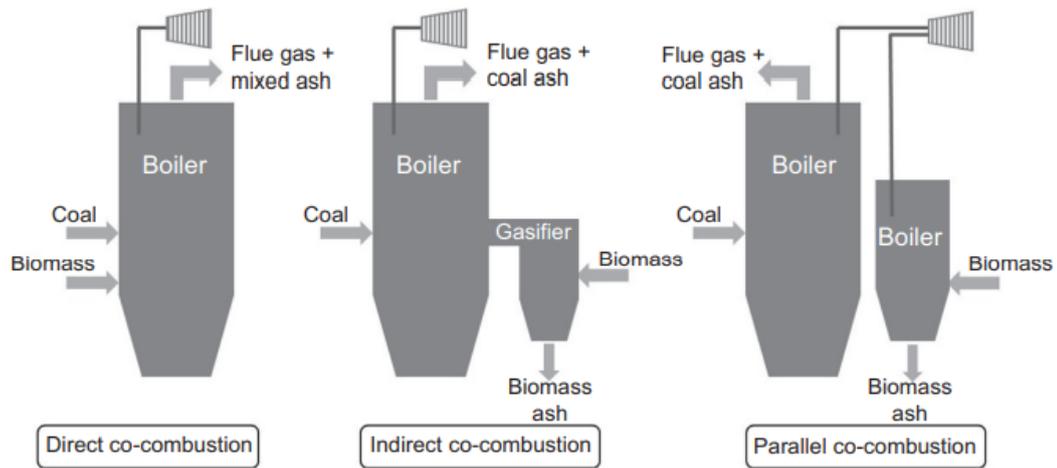
Gambar 2.12 Komparasi biaya pengurangan CO<sub>2</sub> menggunakan teknologi CCS vs *co-firing* (Basu, 2018).

Selain lebih ramah lingkungan karena karbon netralnya. Aplikasi *co-firing* biomassa juga dapat mereduksi pembentukan emisi NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> dan CO (Ndibe dkk., 2015)(Guo & Zhong, 2018) (Xue dkk., 2020).

### 2.6.1 Teknologi *Co-firing*

*Co-firing* biomassa telah berhasil didemonstrasikan di sejumlah besar instalasi di seluruh dunia untuk sebagian besar kombinasi bahan bakar dan jenis

boiler. Ada tiga konfigurasi teknologi untuk *co-firing* biomassa dengan batubara di pembangkit listrik: *co-firing* langsung, *co-firing* tidak langsung, dan *co-firing* paralel. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Skema teknologi *co-firing* (Gil & Rubiera, 2018).

## 2.6.2 Penguraian Emisi melalui Teknologi *Co-firing*

Salah satu produk samping dari pembakaran adalah gas-gas yang berbahaya untuk lingkungan seperti emisi NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> dan CO. Gas SO<sub>x</sub> yang ada dilingkungan akan bereaksi dengan oksigen menjadi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang sering disebut hujan asam, gas NO<sub>x</sub> dilingkungan akan menyebabkan gangguan kesehatan yaitu menurunnya fungsi paru-paru dan meningkatnya risiko kanker. Gas CO dilingkungan akan berbahaya untuk peredaran darah, karena CO lebih mudah terikat dengan hemoglobin yang kemudian membentuk *carboxyhaemoglobin* (Hamra dkk., 2015).

Dari hasil penelitian (Ndibe dkk., 2015)(Guo & Zhong, 2018)(Xue dkk., 2020), *co-firing* dapat mereduksi pembentukan gas-gas ini. Pengurangan NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> pada proses *co-firing* dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu *precombustion* dan *post combustion*. *Precombustion* yaitu dengan cara menggunakan bahan bakar

rendah kandungan nitrogen dan sulfur (Bruce G. Miller and Tillman, 2008). Biomassa secara umum mengandung nitrogen dan belerang dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan batubara. Jadi melalui *co-firing* dapat mengurangi sedikit emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> (Xue dkk., 2020). Pengurangan emisi NO<sub>x</sub> yang sebenarnya biasanya melebihi pengurangan yang diharapkan karena nitrogen yang terikat bahan bakar lebih rendah. Pada penelitian kandungan nitrogen TKKS tertorefaksi lebih tinggi daripada batubara, namun hasil pembakaran menunjukkan pembakaran batubara murni dengan pembakaran bersama, kandungan NO<sub>x</sub> mengalami penurunan dengan penambahan TKKS tertorefaksi. Fenomena ini terjadi karena kandungan *volatile matter* TKKS tertorefaksi relatif tinggi selayaknya bahan bakar biomassa lainnya sehingga membentuk zona temperatur pembakaran yang lebih rendah dibandingkan pembakaran batubara murni (Arifin & Irsyad, 2020). Mengingat NO<sub>x</sub> akan meningkat dengan peningkatan temperatur pembakaran (Sutarto dkk., 2020).

Untuk kasus pereduksian SO<sub>x</sub> dapat terjadi karena murni kandungan sulfur yang rendah yang terkandung biomassa. Temperatur pembakaran rendah sudah menghasilkan gas ini. Emisi CO terbentuk karena terjadinya pembakaran kurang sempurna. Hasil penelitian (Xue dkk., 2020) menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pembakaran akan mengurangi kandungan CO, karena pembakaran akan terjadi lebih sempurna. *Volatil matter* TKKS-TRF melebihi batubara maka TKKS-TRF akan mudah terbakar sehingga pembakaran pada temperatur yang sama dengan batubara akan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna.

### 2.6.2.1 *Direct Co-firing*

*Direct co-firing* adalah opsi *co-firing* biomassa yang paling sederhana, termurah, dan paling banyak digunakan dengan batubara dalam boiler, biasanya menggunakan sistem *pulverized coal*. *Direct co-firing* lebih umum digunakan karena biaya modal yang diperlukan relatif rendah karena tidak banyak instalasi tambahan pada instalasi yang sudah ada (Roni dkk., 2017). Pada *direct co-firing* sendiri, ada dua pendekatan yang dapat dilakukan. Pendekatan pertama dengan mencampurkan dan memberikan *pre-treatment* terhadap biomassa dan batubara dilakukan bersamaan sebelum diumpan ke ruang pembakaran (biasanya kurang dari 5% dalam hal kandungan energi). Pendekatan kedua, *pre-treatment* biomassa dan batubara dilakukan secara terpisah, kemudian diumpan ke ruang pembakaran (Koppejan, 2016). Dalam kebanyakan kasus, input termal biomassa dalam skema pembakaran langsung adalah sekitar 10% karena kendala teknis dan ekonomis (Karampinis dkk., 2015). Keterbatasan ini dapat diminimalisir dengan torefaksi biomassa sehingga berperilaku lebih seperti batubara dalam hal kandungan energi dan perilaku penggilingan (Tumuluru dkk., 2012).

### 2.6.2.2 *Indirect Co-firing*

*Indirect co-firing* atau biasa juga disebut *co-firing gasification* melibatkan proses gasifikasi biomassa padat dalam *gasifier* terpisah sebelum memasuki *burner*. Biomassa akan diubah menjadi *syngas* yang kemudian dibakar dengan batubara di boiler yang sama. opsi ini memungkinkan lebih banyak variasi jenis biomassa dan persentase biomassa yang lebih tinggi untuk digunakan. *Co-firing* tidak langsung dapat mengurangi *slagging* karena biomassa tidak langsung masuk ke tungku batubara, dan memungkinkan pengumpulan residu yang terpisah. Kekurangan dari

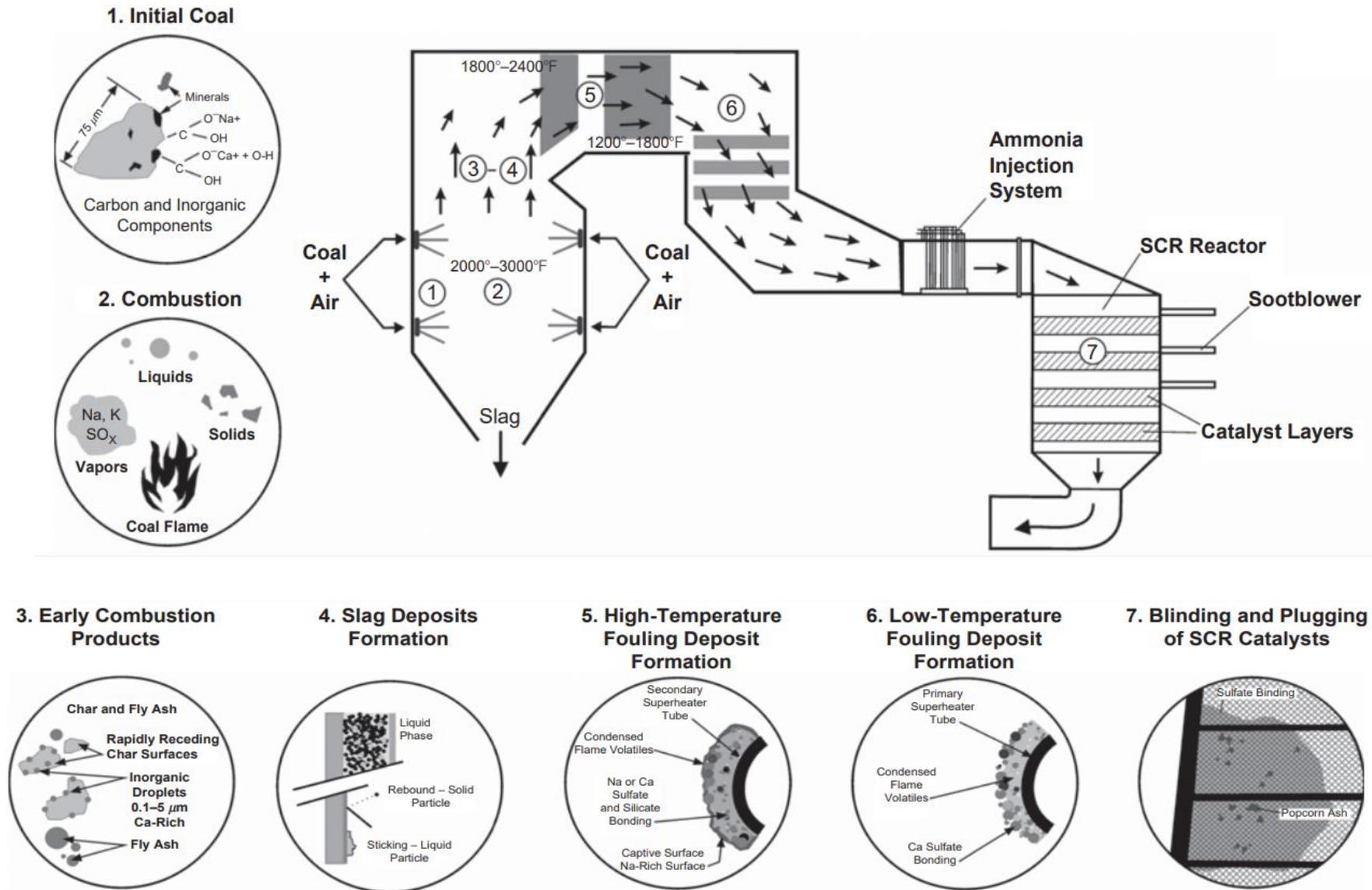
*indirect co-combustion* adalah biaya investasinya yang tinggi karena harus menambahkan instalasi *gasifier* pada sistem pembakaran (Emery & Mosier, 2015).

#### 2.6.2.3 *Parallel Co-firing*

Dalam sistem paralel *co-firing*, sistem pengumpanan dan pembakaran *preprocessing, feeding, dan combustion* biomassa dilakukan secara terpisah. Opsi ini memiliki risiko terendah dengan keandalan tertinggi, karena berjalan secara independen secara paralel dengan unit boiler yang ada. Opsi ini menghindari sebagian besar potensi deposit yang dihasilkan biomassa atau korosi tabung boiler karena gas buang dari biomassa tidak menyentuh permukaan pemanas boiler. Meskipun biaya *co-firing* paralel secara signifikan lebih tinggi daripada opsi langsung, itu masih lebih rendah daripada pembangkit listrik biomassa khusus, dan dapat membantu dalam mengoptimalkan proses pembakaran dan dalam memanfaatkan bahan bakar yang sulit dengan kandungan alkali dan klorin yang tinggi (Gil & Rubiera, 2018). Efisiensi yang dapat dicapai lebih tinggi dari pembangkit listrik biomassa yang berdiri sendiri, sedangkan pengoperasian boiler batubara tidak terpengaruh oleh penambahan bahan bakar biomassa. Residu pembakaran juga diproduksi secara terpisah dan dapat ditangani secara mandiri.

## 2.7 **Formasi Terak Abu**

Karakteristik bahan bakar yang perlu diperhatikan untuk penyebab kerugian pasca pembakaran adalah kandungan abu. Abu merupakan konstituen anorganik yang ada di bahan bakar. Dibanding bahan bakar fasea lain, bahan bakar padat memiliki *inorganic constituen* yang paling tinggi (Lachman dkk., 2021).



Gambar 2.14 Fenomena pembentukan deposit abu di boiler PLTU (Bruce G. Miller and Tillman, 2008).

*Inorganik constituen* bahan bakar padat akan mengalami transformasi kimia dan fisika yang kompleks selama pembakaran untuk menghasilkan beberapa jenis abu. Jenis abu antara ini akan terdiri dari padat, cairan, dan uap. Abu yang tetap padat dan melewati boiler sebagai disebut *fly ash*, abu yang meleleh dan menjadi cairan dapat menempel pada permukaan *tube* dalam tungku dan abu menguap dan mengembun pada permukaan yang lebih jauh ke belakang dalam boiler seperti ke *superheater* (Bruce G. Miller and Tillman, 2008). Karakteristik endapan ini tergantung pada karakteristik kimia dan fisik dari spesies antar abu, geometri sistem (pola aliran gas), temperatur gas, komposisi gas, dan kecepatan gas. Gambar 2.14 mengilustrasikan fenomena pengendapan abu di boiler, mengidentifikasi berbagai area yang memiliki karakteristik pengendapan yang berbeda. Akumulasi abu terjadi melalui pengangkutan partikel ke permukaan perpindahan panas, impaksi permukaan, dan pelekatan partikel. Mekanisme transport yang penting untuk pengendapan abu meliputi mekanisme partikel kecil untuk partikel kurang dari 10 mm, yang melibatkan *thermophoresis*, elektroforesis, dan fase uap dan difusi partikel kecil dan mekanisme partikel besar untuk partikel yang lebih besar dari 10 mm, yang melibatkan impaksi inersia. *Thermophoresis* adalah fenomena yang melibatkan pengangkutan partikel yang sangat kecil sebagai akibat dari gradien termal dari gas panas ke permukaan perpindahan panas yang lebih dingin. Elektroforesis adalah pengangkutan partikel karena perbedaan muatan antara partikel dan permukaan perpindahan panas. Difusi fase uap dan partikel kecil terjadi pada lapisan batas di sebelah permukaan perpindahan panas dan menghasilkan pengangkutan abu ke permukaan perpindahan panas. Impaksi inersia adalah fenomena partikel yang lebih besar di mana partikel memiliki ukuran dan kepadatan

yang cukup untuk meninggalkan pola aliran udara di sekitar tabung dan menumbuk permukaan tabung atau endapan (Bruce G. Miller and Tillman, 2008). Endapan yang terbentuk pada bagian pancaran disebut endapan *slagging* (Gambar 2.15). Endapan yang terbentuk di jalur konvektif pada tabung uap disebut endapan *fouling* (Gambar 2.16). Endapan terak biasanya dikaitkan dengan ketinggian komponen fase cair dan terpapar radiasi dari nyala api. Endapan terak biasanya didominasi oleh fase cair silikat tetapi mungkin juga mengandung fase besi tereduksi tingkat sedang hingga tinggi seperti FeO dan FeS. Deposit *fouling* mengandung tingkat fase cair yang lebih rendah dibandingkan dengan deposit terak.

### 2.7.1 *Slagging*

*Slagging* terjadi pada bagian terdingin boiler. Pada permukaan tersebut, *inorganic volatile condensate* akan menempel dan membentuk deposit (Bruce G. Miller and Tillman, 2008). Selain itu, partikel-partikel yang meleleh, akan mengalami pendinginan dan juga membentuk deposit pada permukaan terdingin boiler. Seiring berjalannya waktu, deposit ini akan semakin tebal dan akan mengisolasi proses perpindahan panas dari *flue gas* ke air atau steam di dalam tube (Madhiyanon dkk., 2012). Contoh akumulasi pembentukan *slagging* diperlihatkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Penampakan *slagging*.

Faktor-faktor yang berkontribusi pada pembentukan endapan terak meliputi:

- a. Pola aliran gas yang menghasilkan partikel yang bertumbukan dan menempel;
- b. Kehadiran udara sekunder yang rendah menyebabkan kondisi reduksi lokal yang meningkatkan kuantitas fase titik leleh yang rendah;
- c. Pembentukan permukaan endapan tawanan cair yang menjadi pengumpul partikel tumbukan yang efisien;
- d. Penurunan perpindahan panas yang menyebabkan peningkatan suhu dalam tungku dan memperburuk masalah terak dan pengotoran;

### 2.7.2 *Fouling*

*Fouling* terbentuk dari penguapan abu yang menjadi *flue gas*, *flue gas* ini melewati permukaan *superheater*, *reheater* dan aliran pipa penguapan. *Flue gas* ini akan membentuk deposit dengan akumulasi waktu sehingga akan merugikan proses perpindahan panas (Zhu dkk., 2019). Gambar 2.16 memperlihatkan *fouling* pada permukaan *heat exchange* pada boiler. Unsur yang paling berpengaruh pada penempelan abu ini adalah material basa terutama Na, yang dalam hal ini adalah kadar  $\text{Na}_2\text{O}$ . Bila kadar abu batubara banyak, kemudian unsur basa dalam abu juga banyak, ditambah kadar  $\text{Na}_2\text{O}$  yang tinggi, maka *fouling* akan mudah terjadi (Bruce G. Miller and Tillman, 2008).



Gambar 2. 16. Penampakan *fouling*.

*Fouling* yang berkembang akan dapat menyebabkan bermacam–macam masalah seperti penurunan temperatur uap pada keluaran (*outlet*) *superheater* dan *re-heater*, serta menyempit dan tersumbatnya jalur aliran gas (Madhiyanon dkk., 2012). Untuk menghilangkan abu ini dapat digunakan *sootblower*, sama seperti penanganan pada *slagging*.

## **2.8 Analisis Index Pembentukan *Slagging***

Pembentukan *slagging* dari proses pembakaran bahan bakar padat memang menjadi perhatian serius manakala akan dijadikan acuan desain awal suatu sistem pembakaran baru maupun sistem pembakaran yang sudah berjalan yang hendak mengganti jenis bahan bakar padatnya. Untuk menganalisa pembentukan *slagging* ini dapat dilakukan dengan pengujian pembakaran langsung sesuai desain operasi yang akan diterapkan. Namun kegiatan pengujian langsung untuk mengevaluasi kecenderungan *slagging* lebih memakan waktu. Oleh karena itu, banyak peneliti yang telah mengembangkan indeks prediktif untuk memperkirakan kecenderungan *slagging*. Basis data yang digunakan perhitungan prediksi *slagging* diperoleh dari komposisi kima abu dan juga dari hasil uji AFT. Namun dari sekian banyak indeks prediktif, basis data yang menggunakan komposisi kimia abu merupakan yang terbanyak. Berikut beberapa metode indeks prediktif yang telah dikembangkan dan dapat digunakan sebagai dasar perhitungan kecenderungan bahan bakar padat membentuk *slagging*.

### **2.8.1 Rasio Basa Asam**

Rasio asam basa ( $R_{B/A}$ ) dikembangkan untuk memprediksi kecenderungan pembentukan *slagging* dengan mengelompokkan jenis senyawa kedalam fraksi

asam dan basa (Lachman dkk., 2021). Dimana setiap oksida diwakili oleh fraksi massa dalam abu (wt%) (persamaan 2.19)

$$R_{B/A} = \frac{\%(Fe_2O_2+CaO+MgO+Na_2O+K_2O)}{\%(SiO_2+Al_2O_3+TiO_2)} \dots\dots\dots(2.19)$$

Berdasarkan persamaan rasio asam basa senyawa asam telah terbukti meningkatkan temperatur leleh keseluruhan sedangkan senyawa basa memiliki efek sebaliknya. Kecenderungan *slagging* abu meningkat dengan meningkatnya rasio B/A. Abu dikatakan memiliki kecenderungan *slagging* yang rendah ketika  $R_{B/A} < 0.206$ , sedang untuk ketika  $R_{B/A} 0.206-0.400$ , tinggi ketika  $R_{B/A} > 0.400$  (Zhu dkk., 2019)(Monika & Sulistyohadi, 2019). Melihat komposisi susunan asam basa dalam indeks empiris Rb/a sangat cocok untuk digunakan pada bahan bakar biomassa.

### 2.8.2 Indeks Asam Basa

Indeks asam basa (B/A) merupakan bentuk sederhana dari rasio asam basa (persamaan 2.20).

$$B/A = \frac{\%(Fe_2O_2+CaO+MgO)}{\%(SiO_2+Al_2O_3)} \dots\dots\dots(2.20)$$

Rasio B/A yang disederhanakan terkadang digunakan untuk mengurangi waktu analisis yang diperlukan untuk mengidentifikasi oksida yang berbeda. Namun, dengan menghilangkan senyawa penting  $K_2O$  dan  $Na_2O$  membuat persamaan ini kurang cocok diterapkan untuk bahan bakar biomassa karena kandungan  $K_2O$  dan  $Na_2O$  biomassa merupakan kandungan penyusun tertinggi komposisi kimia abu (Lachman dkk., 2021). Abu dikatakan memiliki kecenderungan *slagging* yang rendah ketika  $B/A < 0,5$ , sedang untuk  $0,5 < B/A < 1$ , tinggi untuk  $1 < B/A < 1,75$  dan parah untuk B/A di atas 1,75.

### 2.8.3 Sulfur Slagging Index

*Sulfur slagging index* ( $R_s$ ) juga dikenal sebagai *index Babcock* (persamaan 2.21), yang dinyatakan sebagai produk kandungan belerang basis kering hasil pengujian ultimat (%) bahan bakar padat dan rasio kandungan oksida basa dan asam yang terkandung dalam abu. (Pronobis dkk., 2013).

$$R_s = R_{\left(\frac{B}{A}\right)} * S \dots \dots \dots (2.21)$$

Persamaan ini juga sama indeks empiris rasio asam basa hanya dengan menambahkan perkalian dengan kandungan sulfur sehingga persamaan ini juga ideal apabila digunakan untuk menganalisa kecenderungan *slagging* bahan bakar padat yang mengandung banyak logam alkali dan alkali tanah. Abu dikatakan memiliki kecenderungan *slagging* yang rendah ketika  $R_s < 0,6$ , sedang untuk  $R_s$  0,6-2,0, tinggi untuk 2,0-2,6 dan parah untuk  $R_s$  di atas 2,6 (Chen dkk., 2021) (Monika & Sulistyohadi, 2019)(Zhu dkk., 2019)(Pronobis dkk., 2013).

### 2.8.4 Alkali Index

*Alkali index* (AI) yang direpresentasikan dalam persamaan 2.22 merupakan persamaan empiris yang menyatakan jumlah logam alkali yang terkandung dalam abu per unit energi bahan bakar. Energi bahan bakar dinyatakan sebagai nilai kalor dalam satuan MJ/kg. Menurut ambang batas penelitian yang dijelaskan pada penelitian (Chen dkk., 2021)(Guo & Zhong, 2018) kecenderungan *slagging* rendah jika nilai AI  $< 0.17$ , sedang jika nilai AI 0.17-0.34, dan tinggi jika nilai AI  $> 0.37$ .

$$AI = \frac{\% (K_2O + Na_2O)}{HV} \dots \dots \dots (2.22)$$

### 2.8.5 Silika Alumina Index

*Silika alumina index* ( $R_s/a$ ) dikembangkan untuk mengevaluasi kecenderungan pembentukan *slagging* bahan bakar padat dengan menggunakan

persentase kandungan silika yang ada dalam abu yang persatuan % Alumina dalam abu (persamaan 2.23). kemungkinan kecenderungan abu  $R_{s/a}$  masuk kategori rendah Ketika  $R_{s/a} < 1.87$ , Kategori sedang  $R_{s/a}$  1.87-2.65 dan tinggi  $> 2.65$  (Chen dkk., 2021)(Zhu dkk., 2019).

$$R_{s/a} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \dots\dots\dots(2.23)$$

Persamaan ini tepat bila digunakan untuk menganalisa kecenderungan *slagging* bahan bakar padat dengan silika tinggi seperti batubara.

### 2.8.6 Slag Viscosity index

*Slag viscosity index* ( $S_r$ ) dengan rumus empiris persamaan 2.24, seperti yang dijelaskan pada penelitian (Chen dkk., 2021)(Lachman dkk., 2021)(Pronobis dkk., 2013). Nilai silika tinggi hasil perhitungan mengindikasikan nilai yang sangat tinggi, ini membuat kandungan abu yang kaya akan silika memiliki kecenderungan *slagging* rendah. Jika nilai  $S_r > 72$  terbilang jenis abu kategori pembentukan *slagging* rendah, jika nilai  $S_r$  65-75 terbilang jenis abu kategori pembentukan *slagging* sedang dan jika  $S_r < 72$  terbilang jenis abu kategori pembentukan *slagging* tinggi.

$$S_r = \frac{SiO_2 * 100}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \dots\dots\dots(2.24)$$

Selain metode perhitungan *slag viscosity index* di persamaan 2.24, ada metode perhitungan yang menyerupai yang dijelaskan dalam penelitian (Zhu dkk., 2019) yakni rasio silika dengan rumus persamaan sebagai berikut:

$$G = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + SiO_2} \dots\dots\dots(2.25)$$

Secara umum persamaan Sr dan G sejatinya sama, yang membedakan SR memiliki pengali 100. Sehingga dalam penentuan indeks *slagging*, nilai ambang batas G 10 kali lebih rendah dibandingkan Sr.  $G > 0.72$  masuk kategori rendah,  $G 0.65-0.75$  kategori sedang dan  $G < 0.72$  kategori tinggi. Sehingga bisa dikatakan Persamaan Sr dan G ini merupakan metode yang sama untuk menganalisa kecenderungan *slagging* bahan bakar padat.

### 2.8.7 *Fouling Index*

*Fouling Index* (Fu) yang memprediksi kecenderungan bahan bakar padat untuk menyebabkan *fouling* pada permukaan pemanas (Persamaan 2.26). *Fouling index* didasarkan pada rasio B/A dan penjumlahan natrium dan kalium. Natrium dalam kandungan biomassa umumnya rendah, sedangkan kalium mempunyai konsentrasi tinggi dalam biomassa. Kalium telah terbukti menjadi salah satu *inorganic constituen* yang dapat terkondensasi pada partikel *fly ash* yang meningkatkan daya rekat permukaan yang menjadi penyebab *fouling*. (Madhiyanon dkk., 2012) dalam penelitiannya menemukan  $K_2O$  bersama  $SO_2$  dan  $CaO$  menjadi salah satu konstituen pengendapan abu pada area superheater. Kecenderungan *fouling* rendah ketika Fu memiliki nilai  $< 0.6$  dan tinggi ketika nilai  $Fu > 40$ . Sedangkan untuk nilai Fu 0.6-40 memiliki kecenderungan *fouling* sedang (Pronobis dkk., 2013)(Lachman dkk., 2021).

$$Fu = \left(\frac{B}{A}\right) * (Na_2O + K_2O) \dots\dots\dots(2.26)$$

### 2.8.8 *Bed Agglomeration Index*

*Bed agglomeration index* (BAI) dikembangkan untuk mengevaluasi masalah operasi selama pembakaran. Lapisan aglomerasi sering disebabkan oleh kandungan logam alkali yang tinggi. Logam alkali tinggi membuat nilai AFT rendah. Oleh

karena itu, nilai koefisien BAI yang tinggi, menunjukkan bahan bakar rendah dalam pembentukan aglomerasi (persamaan 2.27). Berdasarkan data (Lachman dkk., 2021)(Chen dkk., 2021) lapisan aglomerasi terjadi ketika  $BAI < 0.15$ .

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{Na_2O+K_2O} \dots\dots\dots(2.27)$$

### 2.8.9 Ash Fusibility index

Selain metode prediktif menggunakan komposisi kimia abu bahan bakar, metode lain yang dikembangkan yakni dengan perhitungan indeks empiris menggunakan basis data pengujian AFT. Metode ini disebut *ash fusibility index* (AFI).

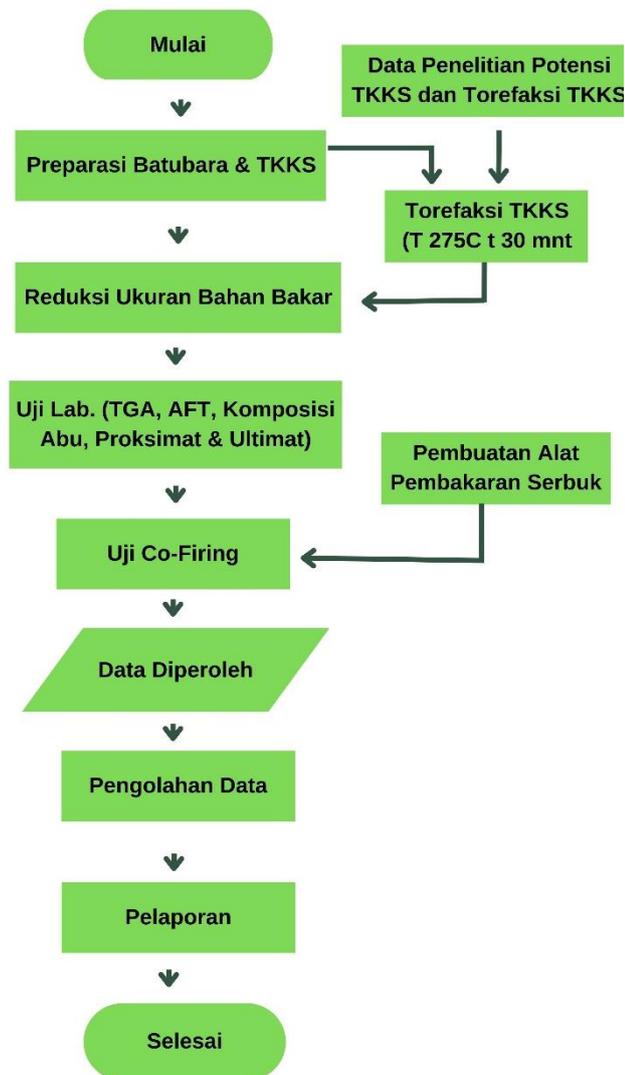
$$AFI = \frac{(4.Dt+HT)}{5} \dots\dots\dots(2.28)$$

Basis data yang digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan *slagging* pada AFI yakni dengan menggunakan hasil uji AFT pada temperatur deformasi awal dan temperatur hemisfer. Menurut ambang batas penelitian yang dijelaskan pada penelitian (Lachman dkk., 2021)(Chen dkk., 2021) kemungkinan *slagging* rendah jika nilai AFI >1342, sedang jika nilai AFI 1232-1342, tinggi jika nilai AFI 1032-1232 dan parah jika AFI <1032.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dititikberatkan pada pengamatan perilaku pembakaran bersama (*co-firing*) antara batubara sub-bituminous B (BB-SBB) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (TKKS-TRF).



Gambar 3.1 Diagram alir kegiatan penelitian.

Pengamatan dilakukan mulai dari karakteristik dari hasil uji laboratorium dan dibandingkan dengan hasil dari proses eksperimen. Adapun karakteristik yang diamati meliputi perilaku termogravimetri bahan, efisiensi pembakaran, hasil pembentukan kandungan emisi *flue gas* pembakaran dan analisis potensi pembentukan terak abu. Adapun metode pembakaran yang digunakan yaitu sistem pembakaran serbuk (*pulverized*) skala laboratorium. Pengamatan karakteristik *co-firing* BB-SBB dan TKKS-TRF bertujuan untuk memberikan informasi terkait kelayakan *co-firing* batubara dengan tandan kosong kelapa sawit dalam aplikasi industri yang sudah ada. Secara garis besar, tahapan penelitian ini tersaji pada 3.1.

### **3.2 Tempat dan Waktu Penelitian**

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, antara lain:

- a. Persiapan unit torefaksi dilakukan di Pelataran Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung;
- b. Preparasi *raw* TKKS dilakukan di Pelataran Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung;
- c. Penjemuran *raw* TKKS dilakukan di Pelataran Laboratorium Terpadu Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung;
- d. Pembuatan TKKS-TRF dilakukan di Pelataran Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung;

- e. Pesiapan Unit Pembakaran *Pulverized* dilakukan di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung;
- f. Preparasi sampel BB-SBB dan TKKS-TRF dilakukan di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung;
- g. Proses pengujian nilai kalor dan analisis proksimat sampel TKKS-TRF di Laboratorium Pengujian Balai Riset dan Standardisasi Industri Bandar Lampung (BARISTAND), Jl. By Pass Soekarno-Hatta Km. 1 Rajabasa Kota Bandar Lampung;
- h. Proses pengujian ultimat sampel TKKS-TRF di Laboratorium Pengujian Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral Batubara (Puslitbang Tekmira) di Jl. Jend. Sudirman No.623 Kota Bandung;
- i. Proses pengujian kandungan kimia abu BB-SBB 100% dan TKKS-TRF 100% dilakukan di Laboratorium Pengujian Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral Batubara (Puslitbang Tekmira) di Jl. Jend. Sudirman No.623 Kota Bandung;
- j. Proses pengujian *ash fusion temperature* dilakukan di Laboratorium Pengujian Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral Batubara (Puslitbang Tekmira) di Jl. Jend. Sudirman No.623 Kota Bandung;
- k. Proses *thermogravimetry Analysis* (TGA) dilakukan di Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi FMIPA Universitas Lampung, Provinsi Lampung,
- l. Proses pengambilan data efisiensi pembakaran dan pembentukan emisi gas buang dilakukan di pelataran Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dengan mendatangkan tim dari Balai Riset dan Standardisasi Industri Bandar Lampung.

### 3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan mulai dari bulan November 2022 sampai dengan bulan April 2023 seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

NO	KEGIATAN	BULAN					
		November	Desember	Januari	Februari	Maret	April
1	Studi Literatur	■					
2	Persiapan alat dan bahan		■	■			
3	Pengujian Laboratorium				■	■	
4	Pengambilan data lapangan				■	■	
5	Analisis Data Uji					■	■
6	Penulisan Laporan					■	■

### 3.3 Bahan Bakar Padat dan peralatan

#### 3.3.1 Bahan Bakar Padat

TKKS diperoleh dari sisa hasil industri PT. Anaktuha Sawit Mandiri, TKKS sebelumnya digunakan akan direduksi ukurannya menjadi 1-2cm kemudian dikeringkan menggunakan energi matahari sampai kadar air turun 13-15%. Setelah kering, TKKS dilakukan torefaksi dengan merujuk pada penelitian (Wahyudi dkk., 2020) yaitu dengan variabel temperatur  $275^{\circ}\text{C}$  dengan waktu tinggal reaksi 30 menit dengan menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket*. Hasil yang diperoleh menunjukkan nilai kalor yang tinggi setara dengan BB-SBB, 5000-5800 kcal/kg (Amrul dkk., 2019). Batubara yang digunakan dari penelitian ini merupakan batubara grade B dari PT. Bukit Asam

Persero dengan nilai kalor 5800 kcal/kg yang banyak digunakan oleh pembangkit di Indonesia. Sampel batubara dan TKKS tertorefaksi kemudian direduksi ukuran menggunakan *ball mill* dan dilakukan pengayakan menggunakan *wire mesh* 200. Proses pembakaran yang akan dilakukan yaitu sistem pembakaran serbuk (*pulverized coal*).

### 3.3.2 Uji Laboratorium Bahan Bakar Padat

Pengujian laboratorium dilakukan sebagai dasar acuan desain pembakaran dan analisis hasil pembakaran. Data uji Laboratorium berguna untuk menentukan *air fuel ratio* (AFR) stoikiometrik, analisis termogravimetri, analisis potensi pembentukan terak abu dan sebagai dasar untuk mengetahui kandungan awal bahan bakar penyebab pembentukan emisi. Karena sampel bahan bakar *co-firing* sama-sama tipe bahan bakar padat, maka parameter-parameter uji Laboratorium yang diperlukan juga sama. Dalam penelitian ini, uji Laboratorium yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

#### 1. Uji Proksimat

Uji proksimat adalah Uji paling dasar untuk bahan bakar padat karena menyangkut komposisi penyusun batubara meliputi persentase kandungan air (*moisture content*), persentase zat mudah terbakar (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*) dan persentase kandungan abu (*ash content*). Analisis nilai proksimat dilaksanakan dengan menggunakan *Thermogravimetric Analyzer* (TGA-501) by Leco seperti pada Gambar 3.2 dengan menggunakan acuan standard ASTM D3172-13.



Gambar 3.2. *Thermogravimetric analyzer (TGA-501) by Leco.*

## 2. Uji Ultimat

Uji ultimat ditentukan menggunakan acuan standar ASTM D 5373. Analisis ultimat dilakukan untuk mengetahui nilai komponen kimia yang terkandung di dalam sampel bahan bakar padat dengan menggunakan *instrument elemental analyzer*. Komposisi elemen kimia atau nilai ultimat yaitu nilai carbon (C), hydrogen (H), dan oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S).

## 3. Uji Nilai Kalor

Data nilai kalor diperlukan untuk melihat kelas bahan bakar dari mulai bahan bakar padat tipe lignit sampai tipe antrasit. Dalam penelitian ini, nilai kalor yang di cari yaitu nilai kalor HHV dan LHV dari masing-masing bakar (BB-SBB dan TKKS-TRF) dan variasi campuran keduanya. Adapun penentuan nilai kalor HHV dan LHV melalui perhitungan empiris menggunakan rumus pada persamaan 2.6 dan 2.7.

## 4. Komposisi kimia abu

Dari hasil analisis proksimat, diperoleh persentase abu dalam bahan bakar. Abu ini merupakan *anorganik constituen* yang merugikan dalam proses

pembakaran terutama dalam proses terjadinya *slagging* dan *fouling*. Sehingga perlu untuk mengetahui komposisi abu dalam setiap bahan bakar untuk memperkirakan karakteristik abu batubara dan *slag*, serta menghitung berbagai parameter korelasinya.

#### 5. Uji *thermogravimetry* (TGA)

Uji termogravimetri (TGA) batubara dan TKKS tertorefaksi dilakukan dengan memanaskan dari suhu sekitar hingga 1000-C pada 100 mL/menit (laju aliran udara) dan 20-C/menit (laju pemanasan). Fungsi dari kegiatan ini yaitu untuk memahami perilaku laju perubahan massa suatu material yang nantinya akan digunakan sebagai data analisis termodinamika pembakaran.

#### 6. Uji *ash fusion temperature* (AFT)

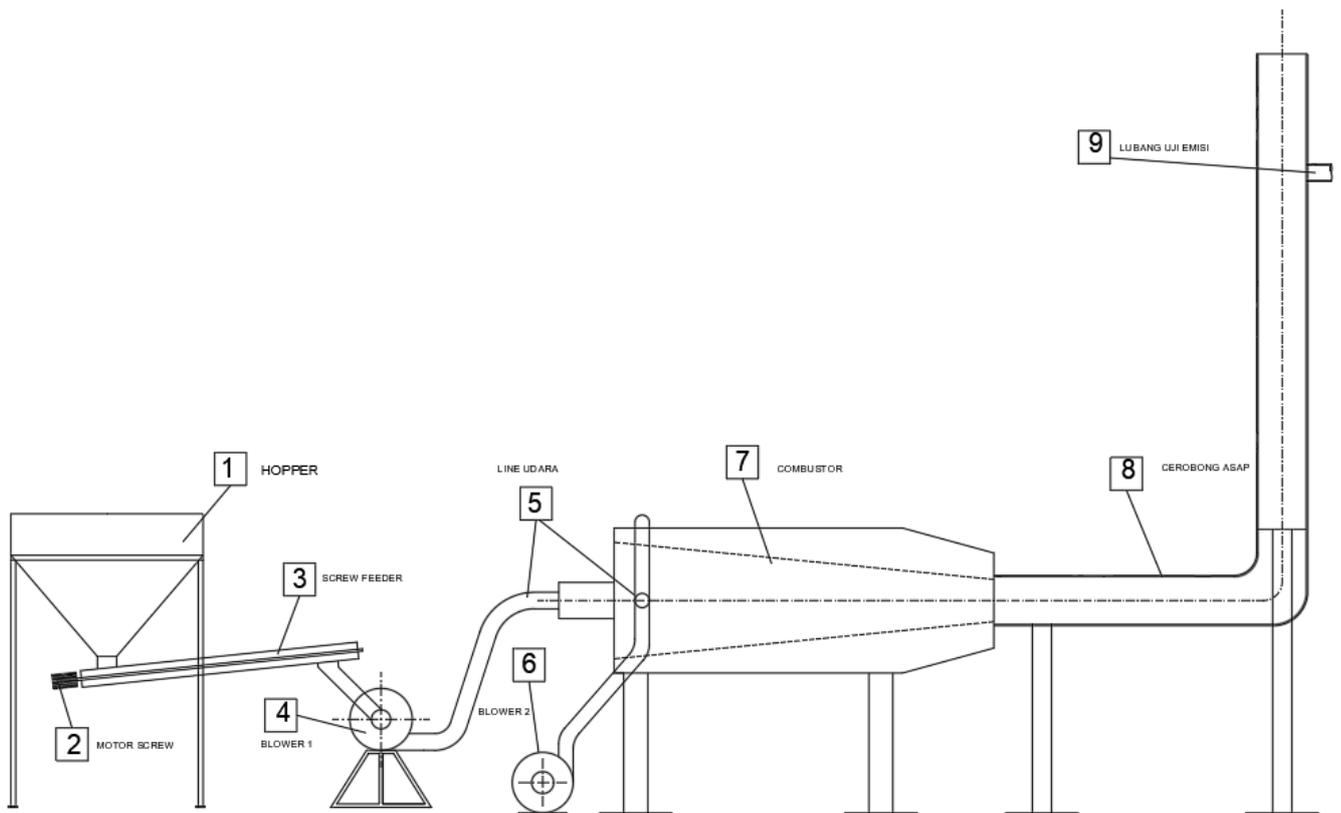
Uji ini difungsikan untuk mengetahui titik reduksi dan oksidasi dari kandungan abu. Hasil uji ini penting sebagai dasar untuk mengetahui prediksi temperatur pembentukan awal *slagging* dan *fouling*, sehingga membantu di dalam menentukan temperatur operasi selama pembakaran batubara di dalam tungku boiler. Uji ini dibagi menjadi 2 yaitu uji AFT oksidasi dan AFT reduksi. Metode uji menggunakan acuan standard ASTM D1857 Dengan menggunakan AF700 by Leco (Gambar 3.3)



Gambar 3.3. Alat uji *ash fusion temperature*.

### 3.3.3 Persiapan Peralatan *Co-firing*

Sebelum melakukan pengujian melakukan instalasi alat pembakaran yang diilustrasikan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Skema diagram pembakaran serbuk.

1. *Hopper*  
Sebagai tempat untuk masuknya *char*.
2. Motor listrik  
Sebagai penggerak *screw conveyor*.
3. *Screw Conveyor*  
Untuk mentransfer secara kontinyu kedua material bahan bakar.
4. *Blower (Primary air)*  
Membawa bahan bakar menuju ruang bakar dan berikan suplai oksigen di ruang bakar
5. Selang  
Sebagai media penghubung *blower* dan *burner*.
6. *Blower (secondary air)*  
Memberikan oksigen tambahan dan untuk membuat aliran turbulensi di ruang bakar.
7. *Burner*  
*Burner* merupakan tempat terjadinya pembakaran dan *mixing* antara bahan
8. *Exhaust Manifold*  
Digunakan sebagai media kolektif hasil gas pembakaran
9. Titik lokasi pengujian emisi  
Area ini digunakan untuk pengambilan sampel pengujian emisi.

#### **3.4 Prosedur Pengujian *Co-firing***

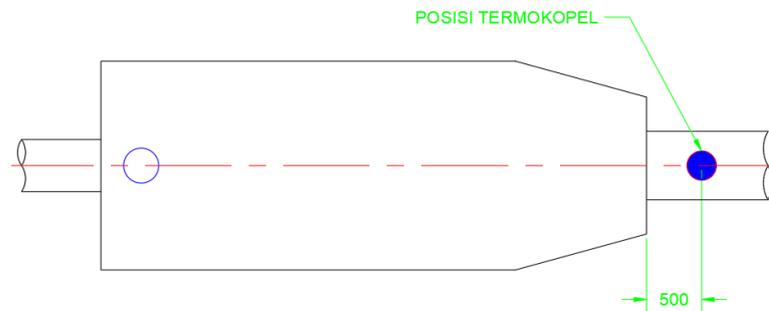
Untuk mendapatkan hasil dari parameter pengujian ini, perlu dilakukan langkah-langkah untuk menentukan standard operasional prosedur (SOP) sebagai berikut:

### 3.4.1 Preparasi sampel

Sampel bahan BB-SBB dan TKKS-TRF dengan ukuran 200 mesh dicampur sesuai dengan persentase yang ditetapkan dalam penelitian yaitu 100% BB-SBB, 100% TKKS-TRF, 90% BB-SBB dan 10% TKKS-TRF, 80% BB-SBB dan 20% TKKS-TRF, 70% BB-SBB dan 30% TKKS-TRF. Hasil dari variabel bahan bakar kemudian dimasukkan kedalam *hopper*. Untuk menentukan persentase pencampuran BB-SBB dan TKKS-TRF menggunakan timbangan digital dengan massa dikalikan persentase masing-masing bahan bakar.

### 3.4.2 Pemanasan Awal *Burner*

Untuk memulai pengujian, karena keterbatasan komponen penyalaan awal *co-firing* maka dilakukan dengan memanaskan *burner* menggunakan batubara hingga mencapai temperatur 800°C.



Gambar 3.5 Posisi penempatan termokopel.

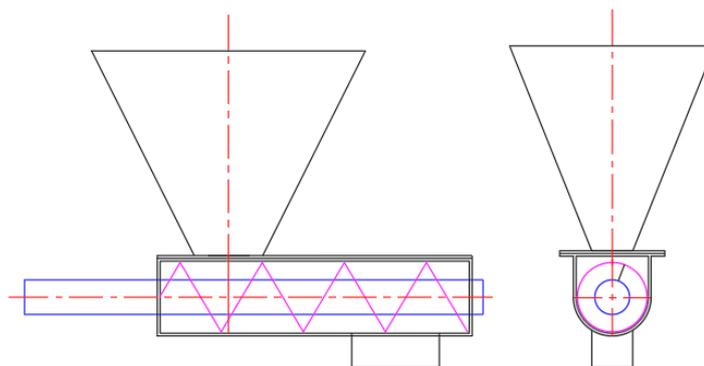
Hal ini dilakukan supaya memudahkan proses pembakaran awal serbuk bahan bakar padat. Pada burner dipasang alat termokopel tipe K sebanyak 1 lokasi seperti pada Gambar 3.5 dan alat uji *Temperature recorder* memiliki pembacaan temperatur maksimal hingga 1200 °C yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Temperatur recorder.

### 3.4.3 Pengujian Co-firing

Setelah sampel bahan bakar siap dan temperatur burner mencukupi, selanjutnya dilakukan pengujian dengan menghidupkan *screw conveyor* dan *blower* sesuai dengan variabel yang telah ditentukan. Laju pengumpanan bahan bakar diatur dengan laju 25 kg/jam. Suplai udara yang digunakan memiliki 4 variasi yaitu *excess air* 0% (stoikiometri), *excess air* 10%, *excess air* 20% dan *excess air* 30%. *Screw conveyor* yang digunakan mempunyai diameter *pitch* 5 cm, *screw pitch* 6 cm, as *screw* 2,5cm dan kapasitas hopper 2 kg seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 *Screw conveyor*.

Sedangkan untuk suplai udara menggunakan 2 unit blower yaitu 1 unit blower udara primer yang berfungsi membawa bahan bakar dari *screw conveyor* dan

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

Tabel 3.2 Kebutuhan udara pembakaran

Laju Pengumpanan bahan bakar (kg/jam)	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)
			0	7,55603	188,900	157,417
25	1,753	7,556034483	10%	8,31164	207,790	173,159
			20%	9,06724	226,681	188,900
			30%	9,82284	245,571	204,642

Untuk menentukan laju masa udara ( $\dot{m}$  udara) primer dan ( $\dot{m}$  udara) sekunder yang berasal dari air blower dapat diketahui dengan menggunakan persamaan dengan nilai  $V_b$  di dapat dari hasil pengukuran kecepatan udara menggunakan alat ukur Anemometer sehingga didapat hasil yang disajikan pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Kebutuhan udara primer & sekunder

Laju Pengumpanan bahan bakar (kg/jam)	Excess Air	Flow Rate (M <sup>3</sup> udara/jam)	Volume Flow Rate (m <sup>3</sup> /jam)		Vair (m/s)	
			Primer	Secondary	Primer	Secondary
25	0%	165,699		70,69		5,41
	10%	182,269	99	87,26	7,269	6,67
	20%	198,839		103,8		7,94
	30%	215,409		120,4		9,21

Setelah semua parameter laju aliran bakar dan laju aliran udara berjalan sampai ke ruang bakar. Terjadilah proses pembakaran bersama antara BB-SBB dan TKKS-

TRF. Mendingkan proses pembakaran sampai temperatur pembakaran stabil. Ketika temperatur pembakaran sudah stabil pada masing-masing variabel, langkah selanjutnya adalah pengambilan sampel kandungan *flue gas* berupa SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO dan CO<sub>2</sub> menggunakan *Gas Analyzer* merk Sauer mann berikut:



Gambar 3.8 Gas analyzer sauer mann.

#### 3.4.4 Penentuan *Slagging Index*

Permasalahan *slagging* terjadi peningkatan tatkala bahan bakar mengandung logam alkali (golongan IA kecuali senyawa hidrogen), logam alkali tanah (golongan II A) dan memiliki nilai AFT rendah. Pada penelitian ini akan menggunakan 5 *indeks* empiris untuk menganalisa kecenderungan *slagging* yaitu: rasio asam basa ( $R_{B/A}$ ), *sulfur slagging index* ( $R_s$ ), *slag viscosity index* ( $S_r$ ), *Alkali index* (AI) dan *ash fusion index* (AFI). Adapun langkah-langkah perhitungan yaitu:

1. Melakukan uji kandungan komposisi kimia abu untuk indeks  $R_{B/A}$ ,  $R_s$ ,  $S_r$ , AI dan melakukan uji *ash fusion temperature* (AFT) AFI;

2. Melakukan pengelompokan hasil uji sesuai kebutuhan masing-masing metode empiris (dijelaskan di subbab ii);
3. Melakukan perhitungan kecenderungan *index slagging*;
4. Mengidentifikasi nilai perhitungan *index slagging* dan membandingkan dengan standard masing-masing metode.

Hasil pengelompokan ini hanya memberikan informasi tingkatan potensi pembentukan.

#### 3.4.5 Variabel Pengambilan Data

Pengambilan data dipengaruhi jenis bahan bakar dan persentase campuran TKKS terhadap batubara, dengan keluaran yang diukur meliputi sebaran panas, pembentukan deposit dan unjuk kerja perpindahan panas pada boiler seperti tertera pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Pengambilan data analisis

No.	Komposisi Bahan Bakar	<i>Excess air</i>	Emisi Gas Buang (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO dan CO <sub>2</sub> )	<i>Thermogravimetric Analysis (TGA)</i>	Potensi Pembentukan <i>slagging</i>
1	BB-SBB	0%	(?)	(?)	(?)
2	BB-SBB	10%	(?)	-	-
3	BB-SBB	20%	(?)	-	-
4	BB-SBB	30%	(?)	-	-
5	BB-SBB 90% + TKKS-TRF 10%	0%	(?)	-	(?)
6	BB-SBB 70% + TKKS-TRF 30%	0%	(?)	-	(?)
7	BB-SBB 80% + TKKS-TRF 20%	0%	(?)	-	(?)
8	BB-SBB 80% + TKKS-TRF 20%	10%	(?)	-	-
9	BB-SBB 80% + TKKS-TRF 20%	20%	(?)	-	-
10	BB-SBB 80% + TKKS-TRF 20%	30%	(?)	-	-
11	TKKS-TRF	0%	(?)	(?)	(?)

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Pengujian *co-firing* batubara sub-bituminous B (BB-SBB) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (TKKS-TRF) dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil uji TG dan DTG menunjukkan bahwa TKKS-TRF mengalami laju kehilangan massa puncak pada zona pelepasan zat volatil ( $200^{\circ}\text{C}$ - $400^{\circ}\text{C}$ ) dengan nilai  $473 \mu\text{g}/\text{menit}$ , zona ini merupakan zona umum pelepasan massa bahan biomassa dan BB-SBB mengalami laju kehilangan massa puncak pada zona pembakaran *fix carbon* biomassa ( $400^{\circ}\text{C}$ - $520^{\circ}\text{C}$ ) karena merupakan batubara grade menengah dengan nilai  $66,178 \mu\text{g}/\text{menit}$ .
2. Hasil *co-firing* sistem pembakaran serbuk menunjukkan bahwa penambahan persentase TKKS-TRF dapat menurunkan temperatur pembakaran dengan nilai pembakaran batubara 100% menghasilkan temperatur lidah api  $818^{\circ}\text{C}$ , TKKS-TRF 100% menghasilkan temperatur lidah api  $649^{\circ}\text{C}$  dan hasil *co-firing* pembakaran stoker menunjukkan semakin tinggi persentase TKKS-TRF dalam bahan bakar dapat mempercepat laju reaksi pembakaran.
3. Pengaruh penambahan TKKS-TRF dan *excess air* dapat meningkatkan efisiensi pembakaran melalui peningkatan pembentukan gas  $\text{CO}_2$  dan mereduksi gas CO. efisiensi pembakaran BB-SBB 100% yaitu 77,23% dengan *excess air* 30% sedangkan efisiensi tertinggi sistem *co-firing* pada penelitian

ini terjadi pada pencampuran BB-SBB 80% dengan TKKS-TRF 20% *excess air* 30% sebesar 83,98%.

4. Pengaruh penambahan TKKS-TRF dan *excess air* dapat menurunkan konsentrasi pembentukan gas NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub>. Pembakaran BB-SBB 100% memiliki nilai NO<sub>x</sub> 410 ppm dan SO<sub>2</sub> 468 ppm. BB-SBB 70% memiliki nilai NO<sub>x</sub> 359 ppm dan SO<sub>2</sub> 324 ppm dan TKKS-TRF 100% memiliki nilai NO<sub>x</sub> 187 ppm dan SO<sub>2</sub> 29 ppm.
5. Hasil skenario pencampuran TKKS-TRF dalam sistem *co-firing* berdasarkan perhitungan basis kimia abu dan uji AFT disimpulkan persentase penggunaan TKKS-TRF yang aman direkomendasikan pada sistem *co-firing* mencapai 20%.

## 5.2 Saran

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan maka untuk menyempurnakan pengembangan penelitian selanjutnya perlu diusulkan saran-saran untuk perbaikan sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pengujian konsentrasi C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> dalam gas buang dan *Carbon Content* dalam abu.
2. Perlu dilakukan pengujian pengaruh unjuk kerja panas dengan sistem *co-firing*.
3. Perlu dilakukan pengujian pembentukan *slagging* secara eksperimen.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abu Bakar, N., Ma, A. N., Choo, Y. M., Mohamad, S., Halim, R., Azali, A., & Zainal, Z. A. (2008). Oil Palm Biomass As Potential Substitution Raw Materials For Commercial Biomass Briquettes Production. *American Journal of Applied Sciences*, 5, 179–183. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.179.183>
- Amrul, Apriyanto, A., Sanjaya, I., & Amrizal. (2018). Experimental Study on Waste Biomass Torrefaction Using a Continuous Tubular Reactor. *PROSIDING Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 2018 - SNTTM XVII*, 304–309.
- Amrul., Wardono, H., & Chandra, N. D. (2022). Pengaruh variasi ukuran partikel terhadap profil suhu pada pembakaran batu bara sub bituminous dengan menggunakan pulverized burner. 17(1), 2–5.
- Amrul, Wijaya, I., & Amrizal, D. (2019). Characteristics of Agricultural Residues Torrefacation Using a Tubular Type Continuous Reactor. *Suparyanto dan Rosad (2015)*, 5(3), 248–253.
- Apriyanto, A., Hamzah, A., & Nafis, A. (2018). Rancang Bangun dan Analsis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *Mechanical*, 9(2), 54. <https://doi.org/10.23960/mech.v9.i2.201809>
- Arifin, Z., Amrul, A., & Irsyad, M. (2021). Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (torrefied biomass). *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(1), 53–60. <https://doi.org/10.24127/trb.v10i1.1468>
- Arifin, Z., & Irsyad, M. (t.t.). *Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (torrefied biomass)*.
- Arinaldo, D., & Adiatama, J. C. (2019). Dinamika Batu Bara Indonesia: Menuju Transisi Energi yang Adil. *Institute for Essential Services Reform (IESR)*, 1–12. <http://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/04/SPM-bahasa-lowres.pdf>
- Armesto, L., Bahillo, A., Cabanillas, A., Veijonen, K., Otero, J., Plumed, A., & Salvador, L. (2003). Co-combustion of coal and olive oil industry residues in fluidised bed. *Fuel*, 82(8), 993–1000. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00397-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00397-6)
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis : practical design and theory*. Academic Press.
- Basu, P. (2013). Introduction. Dalam *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-396488-5.00001-0>

- Basu, P. (2018). Biomass combustion and cofiring. Dalam *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory* (hlm. 393–413). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00011-X>
- BPS. (2020). STATISTIK KELAPA SAWIT INDONESIA. *International Journal of Hypertension*, 1(1), 1–171. <http://etd.eprints.ums.ac.id/14871/%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.cell.2017.12.025%0Ahttp://www.depkes.go.id/resources/download/info-terkini/hasil-risikesdas-2018.pdf%0Ahttp://www.who.int/about/licensing/%0Ahttp://jukeunila.com/wp-content/uploads/2016/12/Dea>
- BRIN. (2022). *E-Layanan Sains BRIN | Badan Riset dan Inovasi Nasional*. <https://elsa.brin.go.id/layanan/index/Analisis%20Proksimate%20Manual%20ASTM%20D3172/2636>
- 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>
- Chen, C., Bi, Y., Huang, Y., & Huang, H. (2021). Review on slagging evaluation methods of biomass fuel combustion. Dalam *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (Vol. 155). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105082>
- Cong, K., Han, F., Zhang, Y., & Li, Q. (2019). The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA. *Fuel*, 237(June 2018), 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.149>
- Dungani, R., Aditiawati, P., Aprilia, S., Yuniarti, K., Karliati, T., Suwandhi, I., & Sumardi, I. (2018). Biomaterial from Oil Palm Waste: Properties, Characterization and Applications. Dalam *Palm Oil*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76412>
- EIA. (2005). *Annual Coal Report*. <http://www.eia.doe.gov/cneaf/coal/acr/acr.pdf>
- Elliott, M. A. (1981). *Chemistry of coal utilization : second supplementary volume*.
- Emery, I., & Mosier, N. (2015). Direct emission of methane and nitrous oxide from switchgrass and corn stover: Implications for large-scale biomass storage. *GCB Bioenergy*, 7(4), 865–876. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12196>
- GAPKI. (2017). *Perkebunan Kelapa Sawit Industri Strategis Energi Terbarukan yang Berkelanjutan - Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI)*. <https://gapki.id/news/1944/perkebunan-kelapa-sawit-industri-strategis-energi-terbarukan-yang-berkelanjutan>
- Gil, M. v., & Rubiera, F. (2018). Coal and biomass cofiring. Dalam *New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking* (hlm. 117–140). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102201-6.00005-4>

- Guo, F., He, Y., Hassanpour, A., Gardy, J., & Zhong, Z. (2020). Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal. *Energy*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>
- 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>
- Hamra, G. B., Laden, F., Cohen, A. J., Raaschou-Nielsen, O., Brauer, M., & Loomis, D. (2015). Lung Cancer and Exposure to Nitrogen Dioxide and Traffic: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives*, 123(11), 1107–1112. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408882>
- Hariana, Prida Putra, H., Milkiy Kuswa, F., Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Disain, B., Pengkajian dan Penerapan Teknologi Gedung, B., Puspiptek, K., & -Tangerang Selatan, S. (2020). *Simposium Nasional RAPI XIX Tahun 2020 FT UMS PREDIKSI AWAL KOMPOSISI BLENDING BATUBARA DAN EFB UNTUK MEMINIMALISASI POTENSI SLAGGING FOULING PADA CO-FIRING PLTU DENGAN PC-BOILER*.
- Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D. A., Triyono, S., Amrul, & Wisnu, F. K. (2021). Torréfaction to improve biomass pellet made of oil palm empty fruit bunch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012047>
- IRENA. (2017). Renewable Energy Prospects: Indonesia. Dalam *International Renewable Energy Agency (IRENA)* (Nomor March). <http://www.irena.org/remap>
- Iryani, D. A., Haryanto, A., Hidayat, W., Amrul, Talambanua, M., Hasanudin, U., & Lee, S. (2019). Torrefaction upgrading of palm oil empty fruit bunches biomass pellets for gasification feedstock by using comb (counter flow multi-baffle) reactor. *TAE 2019 - Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019, September*, 212–217.
- Jayaraman, K., Kok, M. V., & Gokalp, I. (2017). Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis and kinetics of coal-biomass blends. *Renewable Energy*, 101, 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.072>
- Karampinis, E., Grammelis, P., Agraniotis, M., Violidakis, I., & Kakaras, E. (2015). Co-Firing of Biomass with Coal in Thermal Power Plants: Technology Schemes, Impacts, and Future Perspectives. Dalam *Advances in Bioenergy* (hlm. 233–247). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118957844.ch15>
- Khiari, B., Jeguirim, M., Bennici, S., & Limousy, L. (2019). Char combustion. Dalam *Char and Carbon Materials Derived from Biomass* (hlm. 147–185). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814893-8.00005-5>

- KLHK. (2016). Indonesia: First Nationally Determined Contribution. Dalam *Indonesia* (Nomor November).  
[http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Indonesia  
 First/First NDC Indonesia\\_submitted to UNFCCC Set\\_November 2016.pdf](http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Indonesia%20First/First%20NDC%20Indonesia_submitted%20to%20UNFCCC%20Set_November%202016.pdf)
- 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.*
- Koppejan, J., & Loo, S. v. (2007). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing* (J. Koppejan & S. van Loo, Ed.). Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9781849773041>
- Kraiem, N., Jeguirim, M., Limousy, L., Lajili, M., Dorge, S., Michelin, L., & Said, R. (2014). Impregnation of olive mill wastewater on dry biomasses: Impact on chemical properties and combustion performances. *Energy, 78*, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.035>
- Kraiem, N., Lajili, M., Limousy, L., Said, R., & Jeguirim, M. (2016). Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc. *Energy, 107*, 409–418.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.037>
- Krzywanski, J., Rajczyk, R., Bednarek, M., Wesolowska, M., & Nowak, W. (2013). Gas emissions from a large scale circulating fluidized bed boilers burning lignite and biomass. *Fuel Processing Technology, 116*, 27–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.04.021>
- Kupka, T., Mancini, M., Irmer, M., & Weber, R. (2008). Investigation of ash deposit formation during co-firing of coal with sewage sludge, saw-dust and refuse derived fuel. *Fuel, 87*(12), 2824–2837.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.024>
- Lachman, J., Baláš, M., Lisý, M., Lisá, H., Milčák, P., & Elbl, P. (2021). An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels. *Fuel Processing Technology, 217*.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106804>
- Lu, J., Xu, B., Lu, Y., Deng, X., & Eddings, E. (2017). Experimental studies on charging and electric field characteristics of biomass/coal co-combustion ash. *Fuel, 203*(x), 478–487. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.102>
- Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Sungworagarn, S., Pipatmanomai, S., & Tia, S. (2012). A pilot-scale investigation of ash and deposition formation during oil-palm empty-fruit-bunch (EFB) combustion. *Fuel Processing Technology, 96*, 250–264. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.020>
- Maskur, Z., Nugroho, D. A., Pembangkitan, P. T., & Bali, J. (2021). *Analisa Karakteristik Biomasa untuk Cofiring pada Pembangkit Batubara di Indonesia.*

- Matali, S., abd rahman, N., Idris, S., & Yaacob, N. (2018). Enhancement of Energy Properties of *Leucaena Leucocephala* Pellets via Torrefaction and its Non-Isothermal Decomposition Kinetics. *International Journal of Engineering and Technology*, 7, 306–310.
- Mckendry, P. (2002). *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass*.
- Monika, I., & Sulistyohadi, F. (2019). Ash deposit characteristics of blended coal in coal combustion process. *Indonesian Mining Journal*, 22(1), 49–60. <https://doi.org/10.30556/imj.Vol22.No1.2019.675>
- Mundike, J., Collard, F. X., & Görgens, J. F. (2018). Co-combustion characteristics of coal with invasive alien plant chars prepared by torrefaction or slow pyrolysis. *Fuel*, 225(February), 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.024>
- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015a). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *Fuel*, 156, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>
- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015b). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *Fuel*, 156, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>
- Neikov, O. D. (2019). Mechanical Crushing and Grinding. Dalam *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (hlm. 65–90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100543-9.00002-6>
- Nutalapati, D., Gupta, R., Moghtaderi, B., & Wall, T. F. (2007). Assessing slagging and fouling during biomass combustion: A thermodynamic approach allowing for alkali/ash reactions. *Fuel Processing Technology*, 88(11–12), 1044–1052. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.022>
- Orem, W. H., & Finkelman, R. B. (2003). *Coal Formation and Geochemistry*.
- Otero, M., Díez, C., Calvo, L. F., García, A. I., & Morán, A. (2002). Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS. *Biomass and Bioenergy*, 22(4), 319–329. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00012-0)
- PP No. 79. (2014). *PP No. 79 Thn 2014.pdf* (hlm. 1–36).
- Pronobis, M., Kalisz, S., & Polok, M. (2013). The impact of coal characteristics on the fouling of stoker-fired boiler convection surfaces. *Fuel*, 112, 473–482. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.044>
- Roni, M., Chowdury, S., Mamun, S., & Marufuzzaman, M. (2017). *Biomass Co-Firing Technology with Policies, Challenges, and Opportunities: A Global Review*. <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- Shahzad, K., Saleem, M., Ghauri, M., Akhtar, J., Ali, N., & Akhtar, N. A. (2015). 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*, 187(7), 1079–1092.  
<https://doi.org/10.1080/00102202.2014.1002561>
- Sung, Y., Lee, S., Kim, C., Jun, D., Moon, C., Choi, G., & Kim, D. (2016). Synergistic effect of co-firing woody biomass with coal on NO<sub>x</sub> reduction and burnout during air-staged combustion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 71(x), 114–125.  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.10.018>
- 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>
- Thaim, T., Abdul Rasid, R., & Wan Ismail, W. M. S. (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>
- 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>
- Tumuluru, J. S., Hess, J. R., Boardman, R. D., Wright, C. T., & Westover, T. L. (2012). Formulation, Pretreatment, and Densification Options to Improve Biomass Specifications for Co-Firing High Percentages with Coal. *Industrial Biotechnology*, 8(3), 113–132. <https://doi.org/10.1089/ind.2012.0004>
- Wahyudi, R., Amrul, A., & Irsyad, M. (2020a). 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>
- Wahyudi, R., Amrul, A., & Irsyad, M. (2020b). Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, 20(2), 1–8.  
<https://doi.org/10.24036/invotek.v20i2.706>
- Wander, P. R., Bianchi, F. M., Caetano, N. R., Klunk, M. A., & Indrusiak, M. L. S. (2020). Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity. *Energy*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117882>
- Wang, P., Wang, G., Zhang, J., Lee, J. Y., Li, Y., & Wang, C. (2018). Co-combustion characteristics and kinetic study of anthracite coal and palm kernel shell char. *Applied Thermal Engineering*, 143(April), 736–745. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.009>

- Wang, Q., Han, K., Gao, J., Li, H., & Lu, C. (2017). The pyrolysis of biomass briquettes: Effect of pyrolysis temperature and phosphorus additives on the quality and combustion of bio-char briquettes. *Fuel*, *199*, 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.011>
- Wei, X., Guo, X., Li, S., Han, X., Schnell, U., Scheffknecht, G., & Risio, B. (2012). *Wei et al Energy Fuels 2012, 26, 3117–3124.pdf. x*.
- Wijaya, A., Chrysolite, H., Ge, M., Wibowo, C. K., & Pradana, A. (2017). Executive Summary. *World Resources Institute, September*. [https://wri-indonesia.org/sites/default/files/WRI Layout Paper OCN v7.pdf](https://wri-indonesia.org/sites/default/files/WRI%20Layout%20Paper%20OCN%20v7.pdf)
- Xue, Z., Zhong, Z., & Lai, X. (2020a). Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor. *Chemosphere*, *240*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124853>
- Xue, Z., Zhong, Z., & Lai, X. (2020b). Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor. *Chemosphere*, *240(x)*, 124853. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124853>
- Xue, Z., Zhong, Z., Zhang, B., Zhang, J., & Xie, X. (2017). Potassium transfer characteristics during co-combustion of rice straw and coal. *Applied Thermal Engineering*, *124*, 1418–1424. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.116>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, *86(12–13)*, 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yildiz, Z., Uzun, H., Ceylan, S., & Topcu, Y. (2016). Application of artificial neural networks to co-combustion of hazelnut husk-lignite coal blends. *Bioresour Technol*, *200*, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.114>
- Yousaf, B., Liu, G., Abbas, Q., Wang, R., Ubaid Ali, M., Ullah, H., Liu, R., & Zhou, C. (2017). Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar-coal co-combustion systems. *Applied Energy*, *208(October)*, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.059>
- Zhu, C., Tu, H., Bai, Y., Ma, D., & Zhao, Y. (2019). Evaluation of slagging and fouling characteristics during Zhundong coal co-firing with a Si/Al dominated low rank coal. *Fuel*, *254*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115730>