

**STUDI PENGARUH *EXCESS AIR* DAN RASIO CAMPURAN BAHAN BAKAR  
PADA *CO-FIRING* BATUBARA DAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT  
BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC* (CFD)**

**(TESIS)**

**Oleh**

**OBBIE PURNAMA AJIE  
NPM 2025021003**



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

## ABSTRAK

### STUDI PENGARUH EXCESS AIR DAN RASIO CAMPURAN PADA CO-FIRING BATUBARA DAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT BERBASIS COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

Oleh  
**OBBIIE PURNAMA AJIE**

Salah satu transformasi bahan bakar yang memungkinkan untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca adalah mengkombinasikan (*co-firing*) batu bara dengan biomassa tertorefaksi pada pembakaran ketel uap (*boiler*) PLTU. Untuk mendapatkan titik optimal dari *co-firing* batu bara sub-bituminous B dan TKKS Tertorefaksi, dilakukan penelitian melalui simulasi mengingat banyaknya variabel yang perlu dipertimbangkan seperti variasi kehadiran *excess air* dan rasio campuran bahan bakar serta model tungku pembakaran (*burner*) yang digunakan. Simulasi pada penelitian ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan software *Ansys Fluent*. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh geometri dari burner, rasio campuran bahan bakar, dan kehadiran *excess air* terhadap distribusi temperatur dan emisi pembakaran. Rasio campuran TKKS tertorefaksi ke dalam batu bara sub-bituminous B adalah 10%, 20% dan 30%. Kehadiran *excess air* yang ditentukan pada penelitian ini adalah sebesar 0%, 10%, 20% dan 30%. Temperatur rata-rata terendah ditemukan di bahan bakar BB-SBB 70% dengan tanpa kehadiran *excess air* yakni di 901 °C, dan temperatur rata-rata tertinggi ditemukan di bahan bakar BB-SBB 90% dengan *excess air* 30% yakni di 1172 °C. Konsentrasi CO dan HC terendah sekaligus CO<sub>2</sub> tertinggi ditemukan pada BB-SBB 70% dengan *excess air* 30% yakni CO 3197 ppm, HC 1,6 %, dan CO<sub>2</sub> 1,6%. Penambahan TKKS-TRF pada bahan bakar berhasil menurunkan kadar SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> pada outlet ruang bakar. Sedangkan penambahan *excess air* berdampak pada teroksidasinya SO<sub>2</sub> menjadi SO<sub>3</sub> dan meningkatnya NO<sub>x</sub>.

Kata kunci: torefaksi, *co-firing*, *excess air*, *Computational Fluid Dynamics*

## **ABSTRACT**

### **STUDY OF THE EFFECT OF EXCESS AIR AND MIXING RATIO ON CO-FIRING OF COAL AND TORREFACTED EMPTY FRUIT BUNCH BASED ON COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC**

**By  
OBBIE PURNAMA AJIE**

One of the fuel transformations that makes it possible to reduce greenhouse gas emissions is combining (co-firing) coal with torrefaction biomass in the combustion of PLTU boilers. To obtain the optimal point for co-firing sub-bituminous B coal and torrefacted Empty Fruit Bunch (EFB), research was carried out through simulation considering the many variables that need to be considered, such as variations in the presence of excess water and the fuel mixture ratio as well as the burner model used. The simulation in this research uses the Computational Fluid Dynamics method with Ansys Fluent software. The aim of this research is to determine the effect of burner geometry, fuel mixture ratio, and the presence of excess air on temperature distribution and combustion emissions. The mixture ratio of torrefacted EFB and sub-bituminous B is 10%, 20% and 30%. The presence of excess air determined in this study was 0%, 10%, 20% and 30%. The lowest average temperature was found in 70% BB-SBB fuel with no excess air, namely at 901 °C, and the highest average temperature was found in 90% BB-SBB fuel with 30% excess air, namely at 1172 °C. The lowest CO and HC concentrations as well as the highest CO<sub>2</sub> were found at BB-SBB 70% with excess air of 30%, namely CO 3197 ppm, HC 1.6% and CO<sub>2</sub> 1.6%. The addition of TKKS-TRF to the fuel succeeded in reducing SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> levels at the combustion chamber outlet. SO<sub>2</sub>, while the addition of excess water has an impact on decreasing SO<sub>2</sub> and increasing NO<sub>x</sub>.

Keywords: torrefacted EFB, co-firing, excess air, Computational Fluid Dynamics, HC

**STUDI PENGARUH *EXCESS AIR* DAN RASIO CAMPURAN BAHAN BAKAR  
PADA CO-FIRING BATUBARA DAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT  
BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)***

Oleh

**OBBIE PURNAMA AJIE  
NPM 2025021003**

(Tesis)

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

**Pada Program Pasca Sarjana Magister Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



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

Judul Tesis : **Studi Pengaruh *Excess Air* Dan Rasio Campuran Bahan Bakar Pada *Co-Firing* Batubara Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Berbasis *Computational Fluid Dynamic* (CFD)**

Nama Mahasiswa : **Obbie Purnama Ajie**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2025021003**

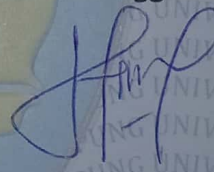
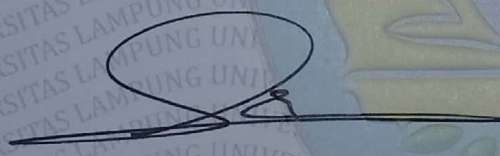
Program Studi : **Magister Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

**MENYETUJUI**  
**Komisi Pembimbing**

Ketua

Anggota



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

**Dr. Harmen, S.T., M.T.**

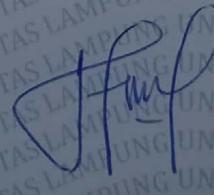
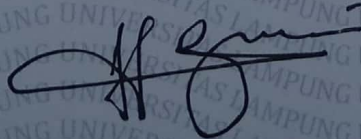
NIP. 197103311999031003

NIP. 196906202000031001

**MENGETAHUI**

Ketua Jurusan  
Teknik Mesin

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



**Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D.**

**Dr. Harmen, S.T., M.T.**

NIP. 197108171998021003

NIP. 196906202000031001



**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

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

Anggota Penguji : **Dr. Harmen, S.T., M.T.**

Penguji Utama I : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**

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

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**  
NIP. 19750928200121002

3. Direktur Program Pasca Sarjana Universitas Lampung

**Prof. Dr. Ir. Muzhadi, M.Si.**  
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **10 Januari 2024**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Apabila ternyata di dalam naskah tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia tesis (MAGISTER) dibatalkan serta diproses sesuai dengan peraturan perundangan-undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 170)

Bandar Lampung, 10 Januari 2024  
Yang membuat,



Obbie Purnama Ajie  
NPM. 2025021003

## **PERSEMBAHAN**

Dengan puji syukur kehadiran Allah SWT, Penulis persembahkan karya ini untuk:

1. Kedua orang tua Bpk. Priyo Wibowo dan Ibu Sri Hernaeni Widyaningsih yang telah mendidik hingga saya menjadi pribadi yang seperti saat ini.
2. Istriku tercinta Alifa Dyah Savira, S.Si dan anakku Shaka Hafidz Albiruni yang telah menemani hari-hariku dengan penuh keceriaan dan kebahagiaan.
3. Kakak dan adikku yang telah mendukung untuk saya menyelesaikan studi magister teknik ini.
4. Keluarga besar di Gading Rejo dan Gunung Terang yang telah memotivasi penulis untuk menyelesaikan studi magister teknik ini.
5. Teman-teman GDR Squad yang sudah menemani perjalanan hidup dan selalu membagi keceriaan serta kebahagiaan.
6. Teman-teman Angkatan 2020 Magister Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu



## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung pada tanggal 3 Juli 1996, yang merupakan anak kedua dari 4 bersaudara, dari pasangan Priyowibowo dan Sri Hernaeni Widyaningsih. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar Negeri (SDN) 7 Gadingrejo pada tahun 2008, kemudian pendidikan Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Gadingrejo yang diselesaikan pada tahun 2011 dan kemudian penulis melanjutkan pendidikan pada Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 1 Gadingrejo dan diselesaikan pada tahun 2014. Selama masa sekolah, penulis mengikuti kegiatan ekstrakurikuler yaitu Pramuka, Paskibra, Musik, MPK dan OSIS. Pada tahun 2014, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Undangan berdasarkan nilai rapor.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Sekretaris Bidang Organisasi dan Kepemimpinan (2015 s.d. 2016) dan Ketua Bidang Organisasi dan Kepemimpinan (2016 s.d. 2017), lalu Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (BEM-FT) Universitas Lampung sebagai Staff Dinas Pengembangan Sumber Daya Manusia (PSDM) (2015 s.d. 2016). Pada tahun 2017, penulis melakukan kerja praktik di PT. So Good Food, Lampung, dengan topik bahasan yaitu **Analisis Energi Terhadap Performa Boiler Tipe *Fluidized Bed Combustion***. Penulis melakukan penelitian skripsi dengan judul “**Model Matematika Bio-Stove dan Diverifikasi Secara Eksperimental**”. Penulis melakukan penelitian tesis dengan judul “**Studi Pengaruh *Excess Air* Dan Rasio Campuran Bahan Bakar Pada *Co-Firing* Batubara Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Berbasis *Computational Fluid Dynamic* (CFD)**”

## SANWACANA

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Alhamdu lillahi rabbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, yang senantiasa mencurahkan nikmat, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul "**Studi Pengaruh *Excess Air* Dan Rasio Campuran Bahan Bakar Pada *Co-Firing* Batubara Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Berbasis *Computational Fluid Dynamic* (CFD)**" dengan sebaik-baiknya. Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Selama pelaksanaan dan penyusunan tesis ini, penulis banyak menerima bantuan, baik berupa moril maupun materil dan bimbingan dari semua pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing utama atas kesediaannya membimbing dan memberi masukan dalam penyelesaian Tesis ini, serta memberikan banyak motivasi dan semangat kepada penulis.
2. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing pendamping Tesis, atas kesediaan dan keikhlasannya untuk berbagi ilmu, memberi dukungan, membimbing, memberi kritik maupun saran yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan sebaik-baiknya.

3. Bapak Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. selaku dosen penguji dalam pelaksanaan Tesis ini, yang telah memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
4. Bapak Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji dalam pelaksanaan Tesis ini, yang telah memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis
5. Bapak Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D. sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, yang selalu memberikan semangat motivasi dan nasihat kepada penulis selama menjalani perkuliahan di Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Mesin yang banyak memberikan ilmu selama penulis melaksanakan studi, baik berupa materi perkuliahan maupun teladan dan motivasi sehingga dapat dijadikan bekal untuk terjun ke tengah masyarakat.
7. Keluarga tercinta, terutama untuk dua orang terhebat dalam hidup penulis, Mama (Sri Hernaeni Widyaningsih) dan Papa (Priowibowo), juga kakak (Dimas Adityawarman) dan adik-adik (Andre Laksamana Ghozy) yang telah memberikan dukungan semangat, moril maupun materil serta selalu mendoakan yang terbaik untuk penulis.
8. Keluarga kecil tercinta, Alifa Dyah Savira dan Shaka Hafidz Albiruni yang selalu memberi semangat dan mewarnai hari-hari saya serta sebagai motivasi terbesar penulis dalam menyelesaikan studi pascasarjananya.
9. Teman-teman angkatan 2020 Magister Teknik Mesin
10. Teman-teman GDR Squad (Andra, Riza, Rizky, Irfan, Rio, Ricky, Gilang, Sholeh, Bagas, dan Ardi) yang sudah menjadi sahabat-sahabat terbaik.

11. Rekan-rekan Teknik Mesin yang tidak bisa saya tuliskan satu persatu, terima kasih telah memberikan dukungan dan semangatnya.
12. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tesis ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih banyak terdapat kesalahan serta kekurangan. Menyadari hal tersebut dengan segala kerendahan hati penulis akan menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca untuk kesempurnaan tesis ini, yang tentunya akan lebih mendorong kemajuan penulis dikemudian hari.

Semoga tesis ini dapat berguna bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya. Akhir kata penulis ucapkan terimakasih.

**Wassalamu'alaikum Wr. Wb.**

Bandar Lampung, 10 Januari 2024  
Penulis,

Obbie Purnama Ajie

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	iii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iv
<b>PERNYATAAN PENULIS</b> .....	v
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	vi
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	vii
<b>MOTTO</b> .....	viii
<b>SANWACANA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	xvii
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan .....	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Sistematika Penulisan . .....	6
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Batu Bara .....	7



2.2. Biomassa Kelapa Sawit .....	12
2.3. Karakteristik Bahan Bakar Padat .....	16
2.4. Torefaksi .....	20
2.5. <i>Co-firing</i> .....	21
2.6. Emisi Pembakaran .....	26
2.7. Analisis Berbasis Perangkat Lunak .....	27
2.8. Persamaan Teoritis .....	31
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Tahapan Penelitian .....	36
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian.....	39
3.3. Pemodelan Pencampuran Bahan Bakar .....	39
3.4. Pemodelan Geometri <i>Pulverized Bed</i> .....	40
3.5. Laju Konsumsi Bahan Bakar, Rasio Pencampuran Bahan Bakar dan Kebutuhan Udara .....	41
3.6. Tahapan Simulasi <i>Co-firing</i> .....	43
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. Sifat Kimia Batu Bara Sub-Bituminous B (BB-SBB) dan Tandan Kosong Kelapa Saswit Tertorefaksi (TKKS-TRF) .....	54
4.2. Verifikasi Proses Simulasi .....	55
4.3. Validasi Proses Simulasi.....	56
4.4. Distribusi Temperatur di Ruang Bakar .....	59
4.5. Emisi CO, CO <sub>2</sub> dan HC Pada Outlet Ruang Bakar .....	68
4.6. Gas Polutan NO <sub>x</sub> dan SO <sub>2</sub> .....	73

## **V. Penutup**

5.1. Kesimpulan .....	79
5.2. Saran .....	80

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Kandungan Oksigen menurut Gugus Fungsi .....	8
Tabel 2.2 Komposisi kimia residu kelapa sawit .....	14
Tabel 2.3 Analisis Proksimat dan Ultimat TKKS dan Batu Bara .....	18
Tabel 2.4 Nilai kalor sampel .....	19
Tabel 3.1 Hasil uji kualitas bahan bakar Batu Bara dan TKKS Tertorefaksi .....	40
Tabel 3.2 Sifat kima dari campuran bahan bakar .....	40
Tabel 3.3 Variasi pencampuran bahan bakar, <i>excess air</i> , dan kebutuhan udara pada inlet primer dan sekunder untuk .....	42
Tabel 3.4 Model numerik yang digunakan pada simulasi <i>co-firing</i> .....	47
Tabel 3.5 <i>Boundary condition</i> kecepatan udara primer dan sekunder .....	49
Tabel 4.1 Hasil uji kualitas bahan bakar padat .....	54
Tabel 4.2 Boundary Condition pada simulasi sesuai dengan parameter pengujian eksperimen .....	57
Tabel 4.3 Hasil emisi pengujian eksperimen .....	57
Tabel 4.4 Hasil emisi pada simulasi Ansys Fluent .....	57
Tabel 4.5 Parameter perbandingan pulverized bed .....	66

Tabel 4.6 Nilai emisi CO, CO <sub>2</sub> , dan HC di outlet ruang bakar .....	69
Tabel 4.7 Nilai polutan NO <sub>x</sub> dan SO <sub>2</sub> di outlet ruang bakar .....	73

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 3.1 Rasio ikatam atom bahan bakar padat .....	7
Gambar 3.2 Usia geologis batubara di dunia .....	9
Gambar 3.3 (A) grade batubara berdasarkan nilai kalor (B) grade batubara berdasarkan komposisi penyusun .....	10
Gambar 3.4 Klasifikasi biomassa.....	12
Gambar 3.5 Pemanfaatan produk samping kelapa sawit.....	13
Gambar 3.6 Grafik analisis proksimat TKKS .....	14
Gambar 3.7 Grafik analisis ultimat TKKS.....	15
Gambar 3.8 Proses dekomposisi kandungan biomassa.....	21
Gambar 3.9 9 Komparasi biaya pengurangan CO <sub>2</sub> menggunakan teknologi CCS vs <i>co-firing</i> .....	23
Gambar 3.10 Skema teknologi <i>co-firing</i> .....	24
Gambar 3.11 Contoh <i>grid generation</i> pada metode pre-processing.....	29
Gambar 3.12 Contoh <i>post-processing</i> untuk bentuk nyala api (a), vector kecepatan (b) dan <i>particle track residence time</i> (c) .....	31
Gambar 3.1 Diagram alir kegiatan penelitian .....	38



Gambar 3.2	Geometri 3D <i>pulverized bed</i> yang akan digunakan pada simulasi <i>co-firing</i> .....	42
Gambar 3.3	Geometri <i>pulverized bed</i> yang akan digunakan pada simulasi <i>co-firing</i> .....	44
Gambar 3.4	Pendefinisian domain .....	44
Gambar 3.5	Hasil <i>meshing</i> pada geometri <i>pulverized bed</i> .....	45
Gambar 3.6	<i>Details of</i> geometri pada <i>pulverized bed</i> .....	46
Gambar 3.7	<i>Model</i> yang dipakai pada simulasi <i>co-firing</i> .....	47
Gambar 3.8	<i>Species Models</i> yang dipakai pada simulasi <i>co-firing</i> .....	47
Gambar 3.9	<i>Input</i> laju konsumsi bahan bakar 0,006944 kg/s sebagai <i>bondary condition</i> .....	50
Gambar 3.10	<i>Input</i> kecepatan udara primer sebagai <i>bondary condition</i> .....	50
Gambar 3.11	<i>Solution methods</i> pada software <i>Ansys Fluent</i> .....	51
Gambar 3.12	<i>Initialization</i> menu .....	52
Gambar 3.13	Grafik <i>residual</i> .....	52
Gambar 4.1	Plot residual pada simulasi.....	55
Gambar 4.2	Perbandingan tren emisi CO pada eksperimen dan simulasi .	58
Gambar 4.3	Perbandingan tren emisi CO <sub>2</sub> pada eksperimen dan simulasi	58
Gambar 4.4	Perbandingan tren emisi SO <sub>2</sub> pada eksperimen dan simulasi.	58
Gambar 4.5	Kontur distribusi <i>temperatur</i> di ruang bakar dengan bahan bakar BB-SBB 100% (A) dan 90% (B) .....	60

Gambar 4.6	6 Kontur distribusi temperatur BB-SBB 100% <i>excess air</i> 30% pada bidang potongan dengan jarak dari pangkal <i>burner</i> (A) 20 cm (B) 40 cm (C) 60 cm (D) 80 cm .....	61
Gambar 4.7	Temperatur maksimum di dalam ruang bakar pada setiap komposisi bahan bakar dan <i>excess air</i> .....	62
Gambar 4.8	Temperatur rata-rata di dalam ruang bakar pada setiap komposisi bahan bakar dan <i>excess air</i> .....	62
Gambar 4.9	(A) <i>Streamline</i> temperature dengan bahan bakar BB-SBB 100% dan <i>excess air</i> 30% <i>Pulverized Bed</i> dengan inlet udara sekunder di 25 cm.....	67
Gambar 4.10	(B) <i>Streamline</i> temperature dengan bahan bakar BB-SBB 100% dan <i>excess air</i> 30% <i>Pulverized Bed</i> dengan inlet udara sekunder di 7,5 cm.....	67
Gambar 4.11	Kontur distribusi temperatur BB-SBB 100% <i>excess air</i> 30% pada bidang potongan dengan jarak dari pangkal <i>burner</i> (A) 20 cm (B) 40 cm (C) 60 cm (D) 80 cm .....	68
Gambar 4.12	Grafik nilai Emisi CO pada outlet ruang bakar untuk masing-masing rasio komposisi bahan bakar dan <i>excess air</i> .....	70
Gambar 4.13	Grafik nilai Emisi CO <sub>2</sub> pada outlet ruang bakar untuk masing-masing rasio komposisi bahan bakar dan <i>excess air</i> .....	70
Gambar 4.14	Grafik nilai emisi HC pada outlet ruang bakar untuk masing-masing rasio komposisi bahan bakar dan <i>excess air</i> .....	71

Gambar 4.15	Grafik nilai polutan NO <sub>x</sub> pada outlet ruang bakar untuk masing-masing rasio komposisi bahan bakar dan <i>excess air</i> .....	74
Gambar 4.16	Grafik nilai polutan SO <sub>2</sub> pada outlet ruang bakar untuk masing-masing rasio komposisi bahan bakar dan <i>excess air</i> .....	74

## DAFTAR SIMBOL

$v_t$	= kecepatan aliran minyak keluar nosel pada waktu	(m/s)
$A_1$	= luas penampang tabung	(m <sup>2</sup> )
$A_2$	= luas penampang nosel	(m <sup>2</sup> )
$g$	= percepatan gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$P_0$	= tekanan awal	(Pa) (bar)
$P$	= Tekanan	(Pa) (bar)
$V_0$	= volume awal minyak	(m <sup>3</sup> )
$Vm_t$	= kecepatan aliran minyak	(m/s)
$\gamma$	= berat jenis	(N/m <sup>3</sup> )
$P_2$	= Tekanan lingkungan	(Pa) (bar)
$h$	= selisih tinggi penampang pipa dan penampang tabung	(m)
$R$	= konstanta gas untuk udara	(J/kg.K)
$m$	= massa	(kg)
$d_{\text{pipe}}$	= diameter nosel	(m)
$D_{\text{tube}}$	= diameter tabung	(m)
$\rho$	= massa jenis	(kg/m <sup>3</sup> )
$t$	= waktu	(s) (min)

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Transformasi energi batubara menjadi sangat penting seiring dengan pertumbuhan konsumsi energi, ditambah kendala perubahan iklim dan kebijakan lingkungan hidup yang semakin ketat. Jumlah emisi karbon global yang semakin meningkat dan munculnya urgensi pengurangan emisi gas rumah kaca, maka *Coal-fired Power Plants* (CPP) diharapkan menjadi kontributor utama untuk mengembangkan transformasi energi batubara dengan biomassa menjadi bioenergi modern. Sebagai jenis sumber energi terbarukan berkualitas tinggi, biomassa terdistribusi secara luas. Selain itu, selama proses pembakaran, lebih sedikit SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> yang diemisikan, sehingga menyebabkan lebih sedikit pencemaran lingkungan (Madanayake dkk, 2017).

Indonesia telah berkomitmen untuk berkontribusi terhadap upaya masyarakat dunia dalam mencegah terjadinya krisis iklim yang bertambah parah. Komitmen ini diwujudkan dalam bentuk aksi mitigasi untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sebesar 29%-41% dari skenario *Business as*



*Usual (BAU)* pada 2030 (KLHL, 2021). Untuk mewujudkan komitmen tersebut perlu diterapkan sebuah terobosan transformasi penggunaan bahan bakar pada PLTU Batu Bara yang berkontribusi terhadap 86% emisi dari sub-sektor pembangkitan tenaga listrik (Arianaldo dkk, 2019). Salah satu transformasi bahan bakar yang memungkinkan adalah mengkombinasikan (*Co-firing*) batu bara dengan biomassa tertorefaksi pada pembakaran ketel uap (*boiler*) PLTU. Mengingat di Indonesia terdapat banyak sumber biomassa khususnya Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang berasal dari limbah pabrik kelapa sawit dan saat ini belum terolah dengan baik. TKKS Tertorefaksi memiliki nilai kalor LHV senilai 21083.98 KJ, setara dengan batu bara sub-bituminous C (Wahyudi, 2020). Oleh karena itu, co-firing antara TKKS tertorefaksi dan Batu Bara dinilai dapat memenuhi kebutuhan energi dari PLTU sekaligus mengurangi emisi.

Performa co-firing sangat bergantung pada tipe combustor yang digunakan. Co-Firing Batu Bara dan Biomassa dalam bentuk serbuk menggunakan *Pulverized Fuel Combustor* menghasilkan lebih sedikit NO<sub>x</sub>, sehingga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca. Selain itu, Biomassa merupakan bahan bakar karbon netral yang dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> pada co-firing dengan Batu Bara (Gil *et al.*, 2019).

Keunikan karakteristik masing-masing dari batu bara dan TKKS tertorefaksi mengharuskan kita mencari komposisi dan kondisi yang tepat untuk mendapatkan performa co-firing yang terbaik. TKKS tertorefaksi memiliki

kandungan Sulfur dan Nitrogen yang lebih rendah dibanding Batu Bara sehingga saat pembakaran menghasilkan emisi gas NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> lebih sedikit (Wahyudi, 2020). Di lain sisi batu bara memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibanding biomassa. Kelebihan karakteristik masing-masing tersebut mendorong perlu dilakukannya studi mendalam untuk mendapatkan komposisi dan kondisi terbaik co-firing batu bara dan TKKS tertorefaksi. Lebih penting lagi bahwa, kualitas bahan bakar adalah faktor utama yang mempengaruhi efisiensi ketel uap (boiler) di PLTU. Oleh karena itu, optimasi co-firing batu bara dan TKKS tertorefaksi sangat perlu dilakukan agar didapat bahan bakar dengan emisi gas minimum dengan nilai kalor optimum sehingga akan berdampak positif pada efisiensi boiler di PLTU.

Untuk mendapatkan titik optimal dari co-firing batu bara dan TKKS Tertorefaksi, dapat dilakukan penelitian melalui simulasi dan eksperimen. Mengingat banyaknya variabel yang perlu dipertimbangkan seperti variasi kehadiran *excess air* dan rasio komposisi pencampuran, maka simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dinilai lebih efektif dan efisien dibandingkan penelitian berbasis eksperimen yang akan menelan lebih banyak waktu, tenaga dan biaya.

Saat ini terdapat banyak software yang mendukung simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Pemilihan software yang tepat juga menentukan keberhasilan dari penelitian ini. Ansys Fluent dipilih sebagai software untuk melaksanakan simulasi ini karena Ansys Fluent memiliki

paket lengkap di dalam *workbench*-nya seperti, untuk permodelan geometri digunakan DesignModeler®, penentuan jumlah grid dan node menggunakan Meshing®, perhitungan iterasi simulasi CFD menggunakan FLUENT®. Dengan fitur yang lengkap tersebut, Ansys Fluent menawarkan user friendly interface agar pengguna dapat melakukan simulasi dengan lebih efektif, efisien dan akurat.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengidentifikasi masalah berikut:

1. Bagaimana distribusi temperatur yang terjadi di ruang bakar?
2. Bagaimana konsentrasi emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran?
3. Bagaimana pengaruh *excess air* terhadap temperature dan emisi yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh rasio bahan bakar terhadap temperature dan emisi yang dihasilkan?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini akan berfokus pada tujuan:

1. Mengetahui pengaruh variasi rasio komposisi bahan bakar dan *excess air* terhadap distribusi temperature di ruang bakar.

2. Mengetahui pengaruh variasi geometri *pulverized bed* terhadap distribusi temperatur.
3. Mengetahui pengaruh variasi rasio komposisi bahan bakar dan *excess air* terhadap konsentrasi emisi CO, CO<sub>2</sub>, dan HC yang dihasilkan pada *outlet* ruang bakar.
4. Mengetahui pengaruh variasi rasio komposisi bahan bakar dan *excess air* terhadap konsentrasi polutan SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada *outlet* ruang bakar

#### 1.4 Batasan Masalah

Kajian pada penelitian ini berfokus pada simulasi proses *co-firing* batubara dan biomassa Tandan Kosong Kelapa Ssawit (TKKS) Tertorefaksi pada sistem pembakaran *pulverized co-firing* menggunakan *Ansys Fluent Fluent*.

Beberapa batasan pada kajian ini sebagai berikut:

1. Pembuatan geometri menggunakan software *SolidWorks*.
2. Simulasi menggunakan software *Ansys Fluent fluent*.
3. Menggunakan bahan bakar biomassa TKKS tertorefaksi dan batubara sub-bituminus B.
4. Co-firing menggunakan sistem *pulverized*.
5. Proses pembakaran dengan proses adiabatik.
6. Penghitungan konsentrasi emisi pada bidang outlet ruang bakar.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematis penulisan dari penelitian ini adalah sbagai 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, pralatan, 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

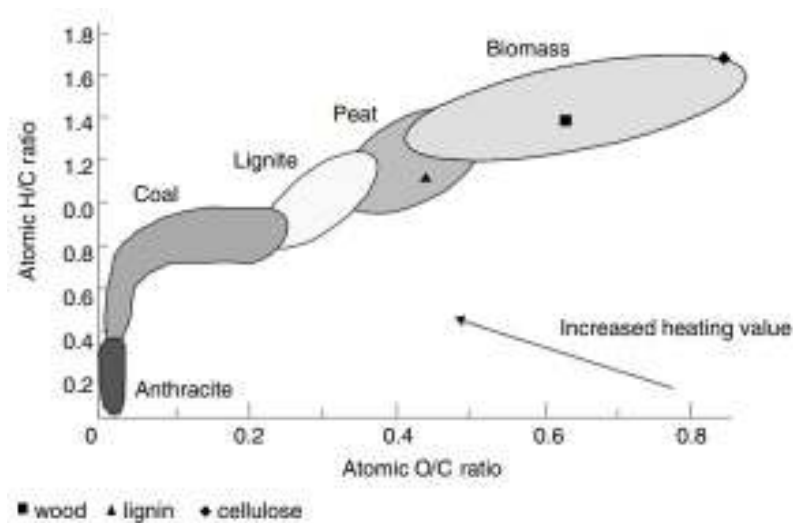
Berisikan perlengkapan laporan penelitelitian.



## I. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Batu Bara

Batu bara merupakan bahan bakar padat 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)

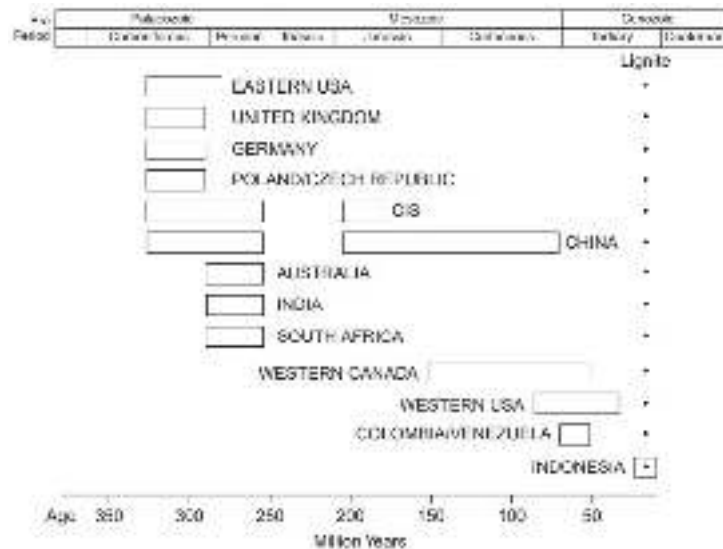
Rasio atom O/C dalam bahan semakin menurun berkorelasi dengan meningkatnya maka nilai kalor dan Ketika rasio atom H:C meningkat dalam bahan bakar maka nilai kalor efektifnya akan menurun (Basu, 2010) Artinya kandungan atom N dan atom O keberadaannya akan merugikan kualitas bahan bakar (Koppejan & Loo, 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). Karena memang biomassa merupakan tumbuhan yang masih mengandung banyak kandungan oksigen dalam bentuk kandungan air walaupun sudah dalam kondisi kering. Kehadiran atom O berbanding terbalik dengan konsentrasi karbon seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 (Miller and Tillman, 2008).

Tabel 2.1 Kandungan Oksigen menurut Gugus Fungsi (%) (EIA, 2005).

Carbon Content (%)	Oxygen Content by Functional Group (wt %)				
	$O_{COOH}$	$O_{OCN}$	$O_{OH}$	$O_{C=O}$	$O_{NH}$
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

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

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.

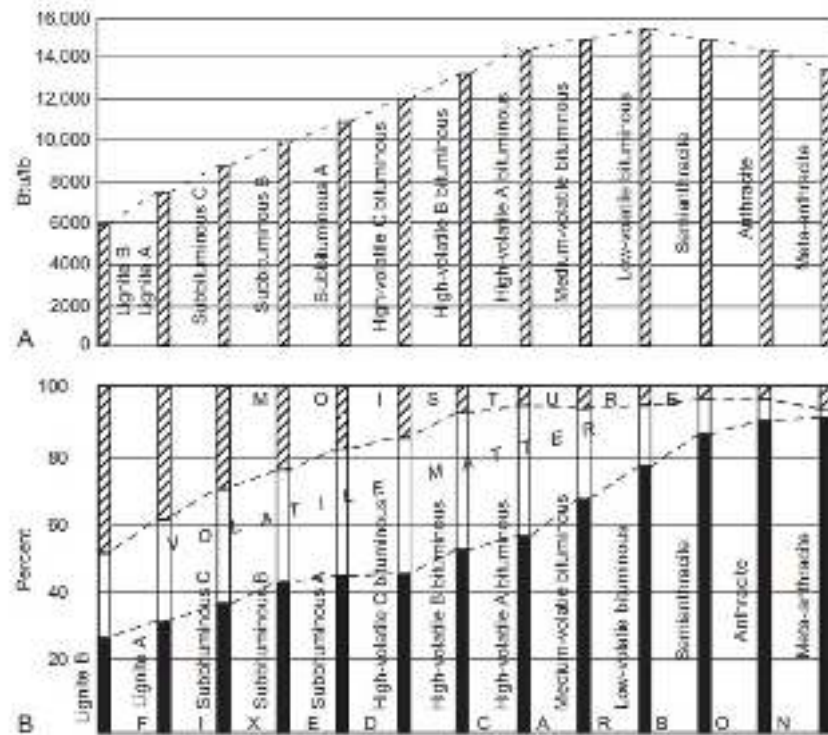


Gambar 2.2. Usia geologis batubara di dunia (Miller and Tillman, 2008).

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.

Proses geokimia yang mengubah sisa-sisa tanaman menjadi batubara disebut *coalification*. Koalifikasi dapat di gambarkan secara geokimia

terdiri dari tiga proses: degradasi mikrobiologis 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 (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 didalamnya 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*

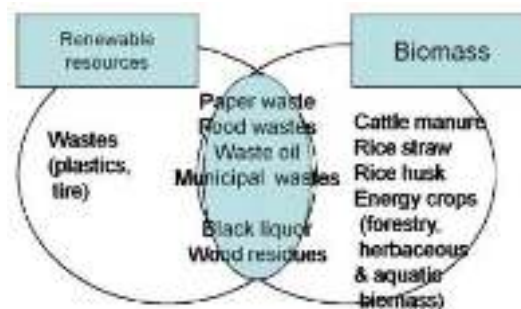
merupakan kandungan bahan bakar yang dihindari karena sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran.

Secara umum, batubara dibagi kedalam lima kelas yaitu, antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.

- a) Antrasit adalah kelas batubara tertinggi dengan warna hitam metalik, mengandung  $\pm 90\%$  unsur karbon (C),  $\pm 5\%$  volatil 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-bituminus mengandung 38%-43% unsur karbon (C), 40-50% volatil matter dengan kadar air 20%-30% dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi pembakaran yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.
- d) Lignit 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.

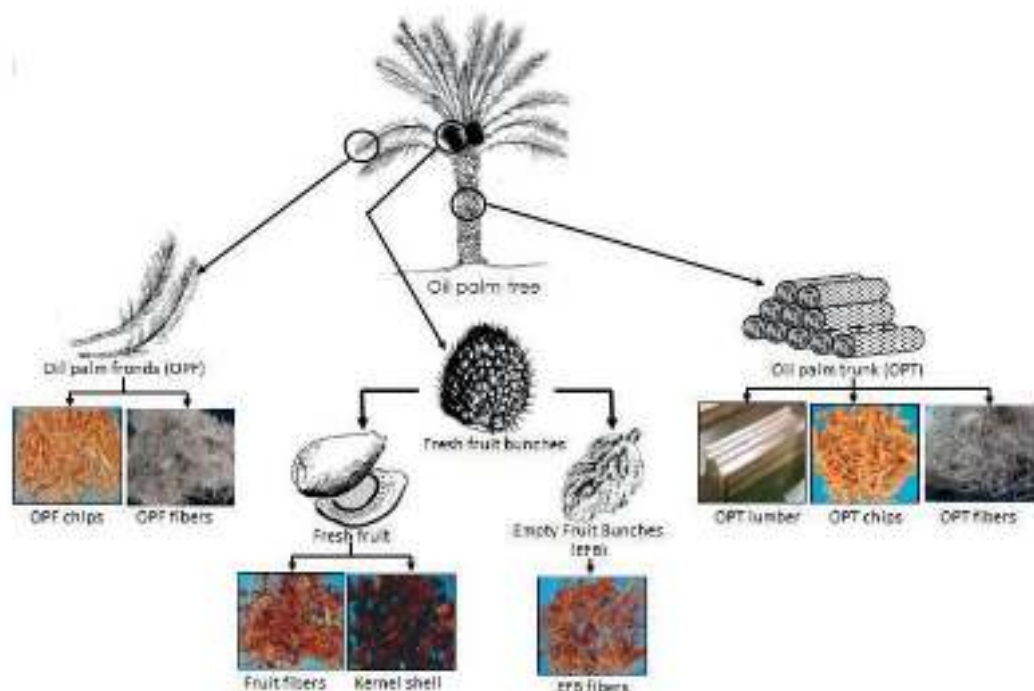
## 2.2 Biomassa Kelapa Sawit

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 hektar (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 terbarui (renewable energy) (GAPKI, 2017). Selain tandan buah segar, ada beberapa produk sampingan kelapas sawit yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



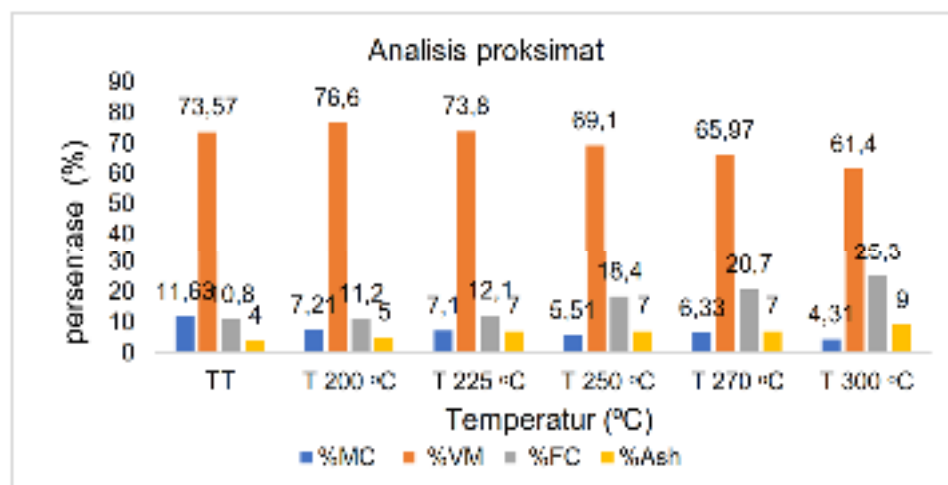
Gambar 2.5. Pemanfaatan produk samping kelapa sawit (Dungani dkk., 2018)

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

Tabel 2.2 Komposisi kimia residu kelapa sawit (Wahyudi dkk., 2020)

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
Cangkung	40-47	27-35	15-19	48-55	1-4

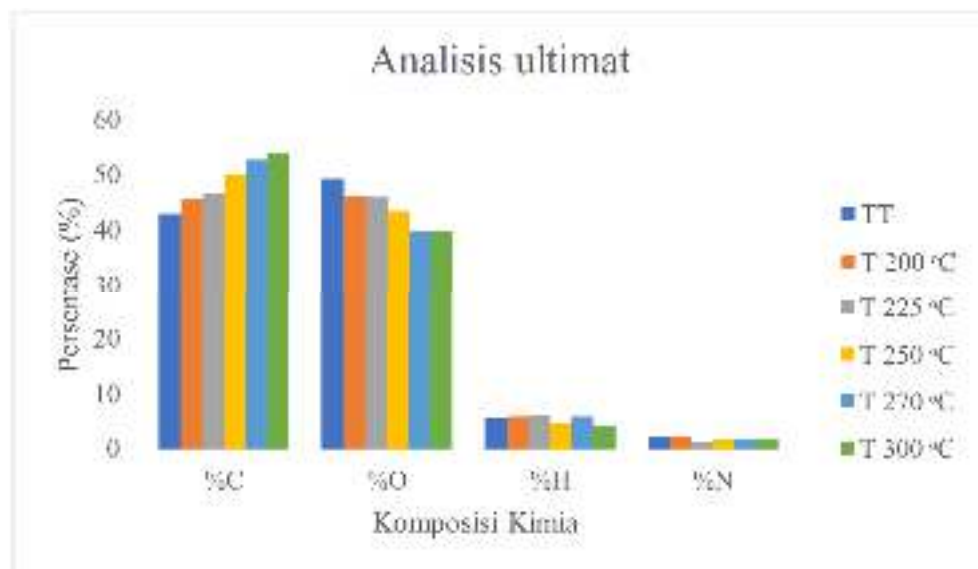
Sedangkan untuk analisis kandungan untuk menentukan potensi energi tandan kosong kelapa sawit. (Wahyudi dkk., 2020) telah melakukan analisis proksimat pada sampel tandan kosong kelapa sawit mentah dengan kondisi dry basis dan sampel hasil torefaksi diperoleh data seperti yang ditampilkan pada Gambar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

## 2.3 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 Analisa 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).

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

Analisis nilai proksimat dilaksanakan dengan menggunakan *Thermografimetric Analyzer* (TGA-501) by Leco dengan menggunakan acuan standart 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 VM 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 (*Fixed carbon*)

Kandungan abu akan terbawa bersama gas pembakaran melalui ruang bakar dan daerah konversi dalam bentuk abu terbang (*fly ash*) yang jumlahnya mencapai 80 % 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 didalam 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).  
 Ultimat:  $C + H + O + N + S + A + M = 100\%$ ..... (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-bituminus B diperoleh dari data sekunder milik PT Bukit Asam, sedangkan untuk data analisis proksimat dan ultimat sampel tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi diperoleh dari data sekunder penelitian (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 dibawah ini. Nilai kalor ini diperoleh menggunakan perhitungan empiris melalui persamaan dibawah ini (Maskur dkk., 2021).

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

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

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

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

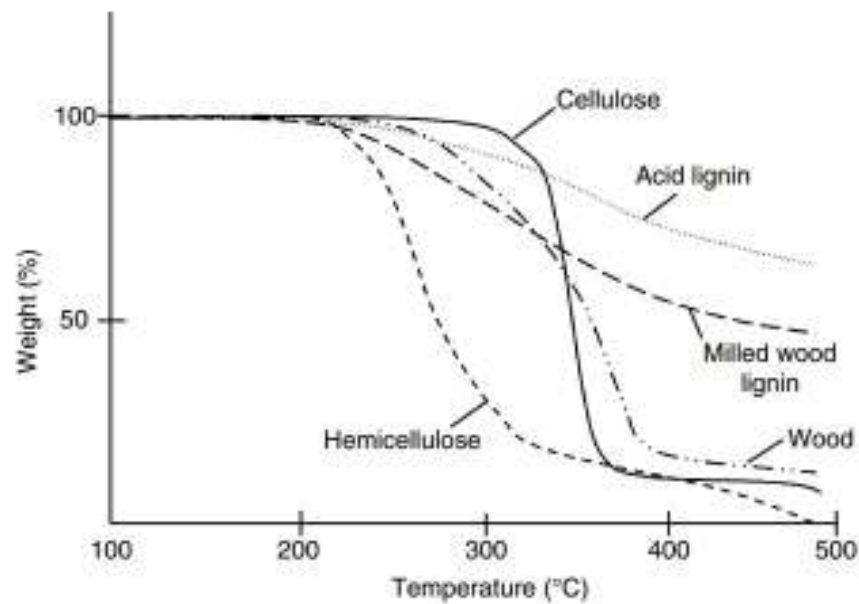
Sampel	HHV [kJ/kg]	LHV [kJ/kg]
TKKS 100%	21083.97	20029.01
Batubara 100%	23562.38	23232.42
Batubara 90%	23314.54	22912.08
Batubara 80%	23066.69	22591.74
Batubara 70%	22818.86	22271.39

## 2.4 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 torrefaksi menghilangkan H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>. Akibatnya menghilangnya 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 TKKK 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 temperature 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 dikonversikan menjadi CO<sub>2</sub>, dekomposisi selulosa pada 240-340° C. Ketika

temperatur dekomposisi  $>280^{\circ}\text{C}$  lignin mulai terdekomposisi. Pada range temperatur  $>280^{\circ}\text{C}$  sudah memasuki zona pirolisis sampai mencapai  $500^{\circ}\text{C}$  (Yang, 2007). Untuk Penurunan berat selulosa, hemiselulosa, dan lignin selama dekomposisi thermal ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Proses dekomposisi kandungan biomassa (Basu, 2010).

## 2.5 *Co-firing*

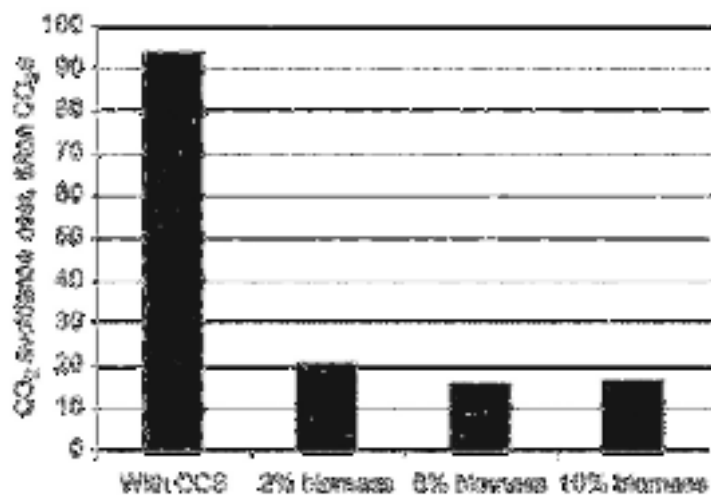
Pembakaran langsung merupakan pilihan penting untuk konversi energi biomassa dan telah digunakan sejak awal peradaban manusia ketika manusia menemukan api (Chen dkk., 2021). Dalam skala kecil, Pembakaran langsung diaplikasikan sebagai sumber energi utama di daerah pedesaan. Penggunaan biomassa terbesar 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 2.9.

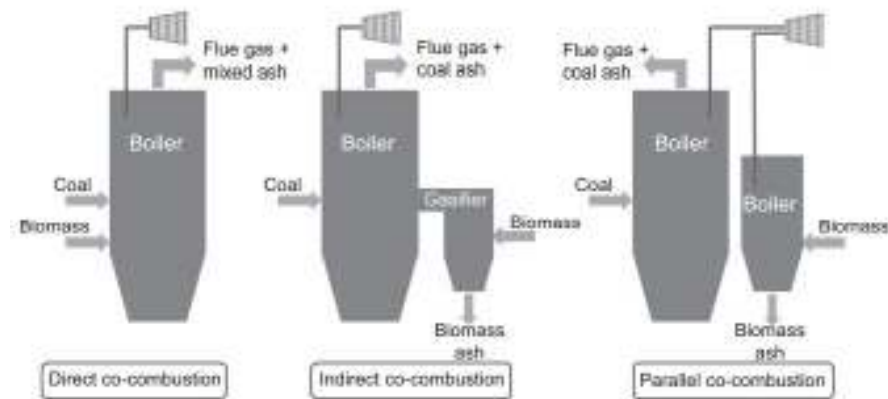


Gambar 2.9 Komparasi biaya pengurangan CO<sub>2</sub> menggunakan teknologi CCS vs *co-firing* (Basu, 2018)

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

### 2.5.1 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 2.10.



Gambar 2.10 Skema teknologi *co-firing* (Gil & Rubiera, 2018)

### 2.5.2 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 resiko 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 volatil matter TKKS tertorefaksi relatif tinggi selayaknya bahan bakar biomassa lainnya sehingga membentuk zona temperatur pembakaran yang lebih rendah dibandingkan pembakaran batubara murni. 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 sanya semakin tinggi temperatur pembakaran akan mengurangi kandungan CO, karena pembakaran akan terjadi lebih sempurna. Karena *volatil matter* TKKS tertorefaksi

melebihi batubara maka TKKS torefaksi akan mudah terbakar sehingga pembakaran pada temperatur yang sama dengan batubara akan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna.

## 2.6 Emisi Pembakaran

Emisi dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan salah satu konsentrasi permasalahan dalam penggunaan bahan bakar fosil dimana emisi yang dihasilkan selama proses pembakaran dapat membahayakan kesehatan publik. Produk utama pembakaran karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dapat menimbulkan efek rumah kaca dan pembentukan kabut lokal. Adapun produk sekunder proses pembakaran adalah karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), hidrokarbon yang tidak terbakar ( $\text{HC}$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan jelaga. Apabila produk emisi ini terus dibiarkan dan tidak terkontrol dalam udara maka dapat menyebabkan masalah bagi kesehatan dan lingkungan hidup dalam bentuk pencemaran.

Sementara itu dua parameter utama yang mempengaruhi formasi polutan dalam pembakaran adalah temperatur dan waktu tinggal. Temperatur merupakan parameter terpenting di dalam proses pembakaran karena laju reaksi eksponensial bergantung pada temperatur. Sebagai contoh formasi  $\text{NO}$  dalam proses pembakaran sangat tergantung pada temperatur yang digunakan. Temperatur berdampak pada serangkaian reaksi kimia tertentu

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

## 2.7 Analisis Berbasis Perangkat Lunak

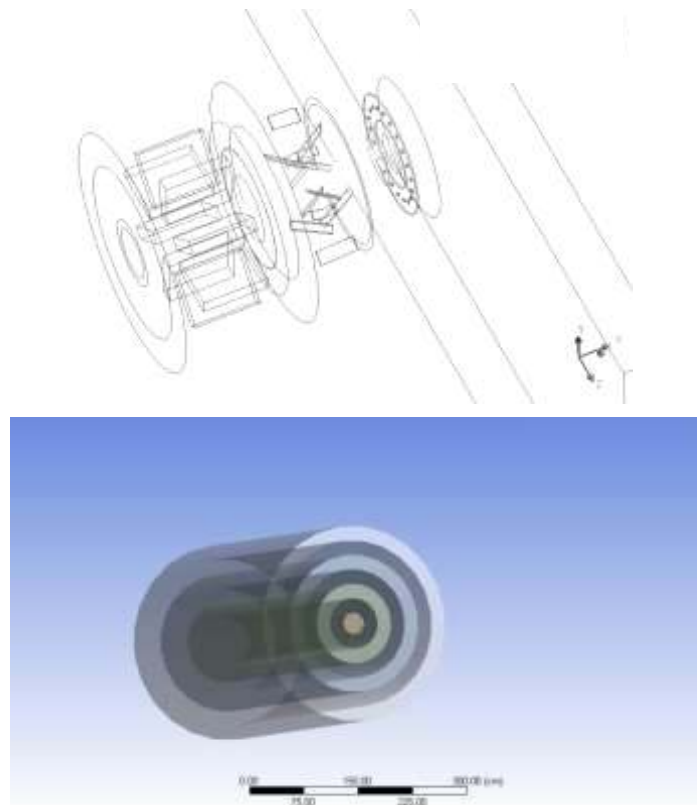
Selain menggunakan metode teoritis dan ekperimental, sebuah kasus co-firing berbahan bakar serbuk menggunakan *pulverized bed* juga dapat diselesaikan dengan metode simulasi perangkat lunak. Untuk menyelesaikan dengan metode simulasi digunakan software Computational Fluid Dynamic (CFD).

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan engineering tools analisis sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena yang terkait lainnya seperti reaksi kimia dengan menggunakan model matematis yang valid secara simultan dengan bantuan komputer. Fenomena-fenomena pada suatu sistem dapat dimodelkan dengan menggunakan kode CFD yang merupakan rentetan algoritma numerik yang mewakili fenomena perpindahan, aliran fluida, reaksi kimia, dll. CFD sendiri memiliki langkah-langkah sistematis yang harus dipenuhi agar hasil analisis menjadi akurat. Tahap dalam CFD tersebut adalah *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

*Pre-processing* meliputi analisa awal mengenai fenomena yang terjadi serta pengumpulan data yang diperlukan untuk metode solver. Langkah-langkah dalam tahap ini:

- Pendefinisian dimensi geometri yang dianalisis baik 2D atau 3D dengan ukuran yang riil.
- Grid generation, yaitu pembagian domain geometri menjadi beberapa boundary condition yang disesuaikan dengan fenomena pada sistem yang dianalisis.
- Pendefinisian fenomena fisik dan kimia yang perlu dimodelkan.
- Pendefinisian boundary condition (kondisi batas) pada geometri.
- Pembagian geometri menjadi sejumlah kontrol volume atau *cell* (sel). Keakuratan penyelesaian CFD ditentukan oleh jumlah sel dalam grid dan karakteristik grid tersebut.
- Penyelesaian permasalahan aliran (kecepatan, tekanan, temperatur, dan sebagainya) yang didefinisikan pada titik nodal dalam tiap sel.

Contoh pendefinisian geometri dalam *pre-processing* :



Gambar 2.11 Contoh *grid generation* pada metode pre-processing (Pratama dan Hoedaya, 2013 dan Triwibowo dan Fitriady, 2010)

*Solver* dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu : *finite difference*, *finite element*, *finite volume* dan metode spektral. Secara umum metode numerik solver tersebut terdiri dari langkah- langkah sebagai berikut :

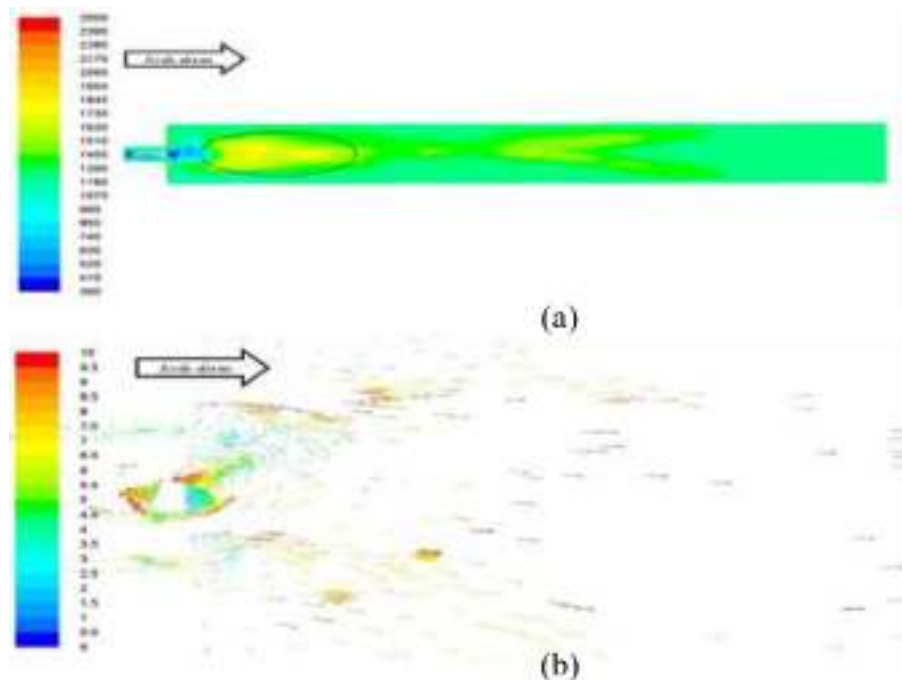
- Prediksi variabel aliran yang tidak diketahui dengan menggunakan fungsi sederhana.
- Diskretisasi dengan substitusi prediksi-prediksi tersebut menjadi persamaan-persamaan aliran utama yang berlaku dan kemudian melakukan manipulasi matematis.
- Penyelesaian persamaan aljabar.

- Metode *finite volume* adalah pengembangan khusus dari formulasi *finite difference*. *Finite volume* digunakan pada berbagai CFD kode komersial.

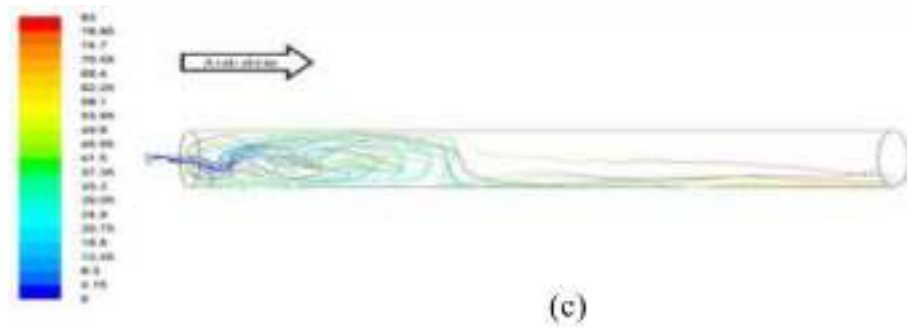
*Post-processing* merupakan tahap visualisasi dari hasil tahapan sebelumnya. *Post-processor* semakin berkembang dengan majunya *engineering workstation* yang mempunyai kemampuan grafik dan visualisasi cukup besar. Alat visualisasi tersebut antara lain:

- 1) Plot vektor.
- 2) Plot kontur.
- 3) Plot 2D dan 3D surface.
- 4) Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, skala, dan sebagainya).
- 5) Animasi display hasil dinamik

Contoh *post-processing* pada sistem pembakaran pada tubular reaktor :







Gambar 2.12 Contoh *post-processing* untuk bentuk nyala api (a), vector kecepatan (b) dan *particle track residence time* (c) (Triwibowo dan Fitriady,2010)

Di dalam simulasi, model-model yang digunakan didiskretisasi dengan metode formulasi dan diselesaikan dengan menggunakan algoritma-algoritma numerik yang disesuaikan dengan permasalahan dan sistem yang akan dimodelkan.

Model – model menyelesaikan persamaan-persamaan kekekalan massa, momentum, energi, fraksi massa spesies gas, fraksi massa, dll

## 2.8 Persamaan Teoritis

Telah dibahas sebelumnya bahwa CFD merupakan salah satu engineering tools di dalam penyelesaian sebuah masalah di industri ataupun melihat suatu fenomena yang ditransformasikan dalam algoritma-algoritma numerik. Pada proses pembakaran sendiri ada banyak sekali fenomena yang terjadi, seperti aliran fluida, transfer energi, neraca momentum, reaksi kimia, *ignition phenomena*, dan model turbulensi.

Algoritma numerik yang digunakan merupakan model matematis dari *software* ANSYS<sup>®</sup> 2021 *Academic Package*. Untuk permodelan geometri digunakan

DesignModeler<sup>®</sup> dengan penentuan jumlah *grid* dan *node* menggunakan Meshing<sup>®</sup>. Perhitungan iterasi simulasi CFD menggunakan FLUENT<sup>®</sup>.

### 2.8.1 Persamaan Kontinuitas dan Kekekalan Momentum

Model-model kekekalan massa, momentum dalam koordinat kartesius adalah sebagai berikut.

#### 1. Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left( \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right) + S_m \quad (2.9)$$

$S_m$  sendiri merupakan massa yang ditambahkan pada fase kontinum dari fase kedua yang terdispersi (misal dari evaporasi liquid jika terbentuk droplet atau dari sumber yang lain).

#### 2. Persamaan Momentum (Hukum Kekekalan Momentum)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.10)$$

Dengan persamaan tensor:

$$\vec{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2.11)$$

(Theory Guide, Ansys Fluent 2021)

### 2.8.2 Turbulensi

Turbulensi merupakan suatu fenomena yang tidak linier, tiga dimensi, dan berubah terhadap waktu. Pada aliran turbulen, secara kontinu terbentuk pusaran-pusaran besar yang kemudian terpecah menjadi pusaran-pusaran yang lebih kecil dan akhirnya menghilang (dissipasi). Partikel-partikel fluida

yang semula berjauhan dapat dibawa saling mendekati dengan adanya pusaran pada aliran turbulen ini. Sebagai konsekuensinya, pertukaran panas, massa dan momentum menjadi sangat efektif. Pencampuran yang efektif ini akan menyebabkan koefisien difusi yang besar untuk perpindahan massa, momentum, dan panas. Tetapi kehilangan energi yang terjadi pada aliran turbulen juga lebih besar dibandingkan pada aliran laminar. Hal ini terjadi karena pusaran-pusaran yang terjadi melakukan kerja melawan *viscous stress* sehingga energi yang terkandung dalam pusaran akan terdisipasi menjadi panas.

Penelitian ini menggunakan *standard k-ε model* yang berdasarkan persamaan *transport model* untuk energi kinetika turbulen ( $k$ ) dan laju dissipasi ( $\varepsilon$ ) yang diperoleh dari persamaan transpor berikut

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.12)$$

dan

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.13)$$

Dalam persamaan ini,  $G_k$  menunjukkan generasi energi kinetik turbulen yang disebabkan *meanvelocity gradient*.  $G_b$  menunjukkan generasi dari energi kinetik turbulen karena *buoyancy*.  $Y_M$  menunjukkan kontribusi dari dilatasi yang berfluktuasi dalam *compressible turbulence* terhadap rate dissipasi *overall*.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ , dan  $C_{3\varepsilon}$  adalah konstanta,  $\sigma_k$  dan  $\sigma_\varepsilon$  sebagai bilangan Prandtl turbulen untuk  $k$  dan  $\varepsilon$ , sedangkan  $S_k$  dan  $S_\varepsilon$  adalah *user defined source term*.

Dengan konstanta model,  $C_{1\varepsilon} = 1,44$  ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$  ;  $\sigma_k = 1$  ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .  
(Theory Guide, Ansys Fluent 2021)

### 2.8.3 Persamaan Energi

ANSYS FLUENT menyelesaikan persamaan energi dalam bentuk sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} (E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{x}) \right) + S_h \quad (2.14)$$

Dimana  $k_{eff}$  merupakan konduktivitas efektif, dan  $J_j$  merupakan fluk difusi dari spesies  $j$ . Pada sisi sebelah kanan persamaan di atas dimewakili persamaan energi dari konduksi, spesies difusi, dan dissipasi *viscous*.  $S_h$  merupakan panas yang berasal dari reaksi kimia dan sumber panas lainnya.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (2.15)$$

Nilai sensibel entalpi  $h$  untuk gas ideal didefinisikan sebagai,

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (2.16)$$

dan untuk aliran *incompressible*,

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (2.17)$$

Pada persamaan (2.9),  $Y_j$  adalah fraksi massa dari spesies  $j$  dan

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (2.18)$$

Pada simulasi ini terdapat reaksi sehingga terdapat sumber energi yang berasal dari reaksi tersebut. Sumber energi  $S_h$  pada persamaan (2.19) juga termasuk sumber energi yang berasal dari reaksi kimia, yaitu :

$$S_{h, reaction} = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (2.19)$$

Dimana  $h^0_j$  adalah entalpi pembentukan spesies  $j$  dan  $R_j$  adalah laju volumetrik dari pembentukan spesies  $j$ .

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Penelitian

Substansi dari penelitian ini adalah melakukan studi *co-firing* antara batubara sub-bituminus dengan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi untuk mengetahui distribusi temperature, dan emisi yang terjadi di ruang bakar dengan variabel *Excess Air*, dan Rasio Campuran Bahan Bakar pada sistem pembakaran *pulverized* (Pembakaran Serbuk) menggunakan bantuan program software Solidworks dan ANSYS. Beberapa tahapan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Untuk dapat memahami dan menganalisa permasalahan yang ada maka dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan proses pembakaran, persamaan kimia bahan bakar, CFD, dan Ansys Fluent. Studi literatur diperoleh dari jurnal, e-book, tugas akhir, manual book, handbook maupun website.

2. Pengumpulan Data

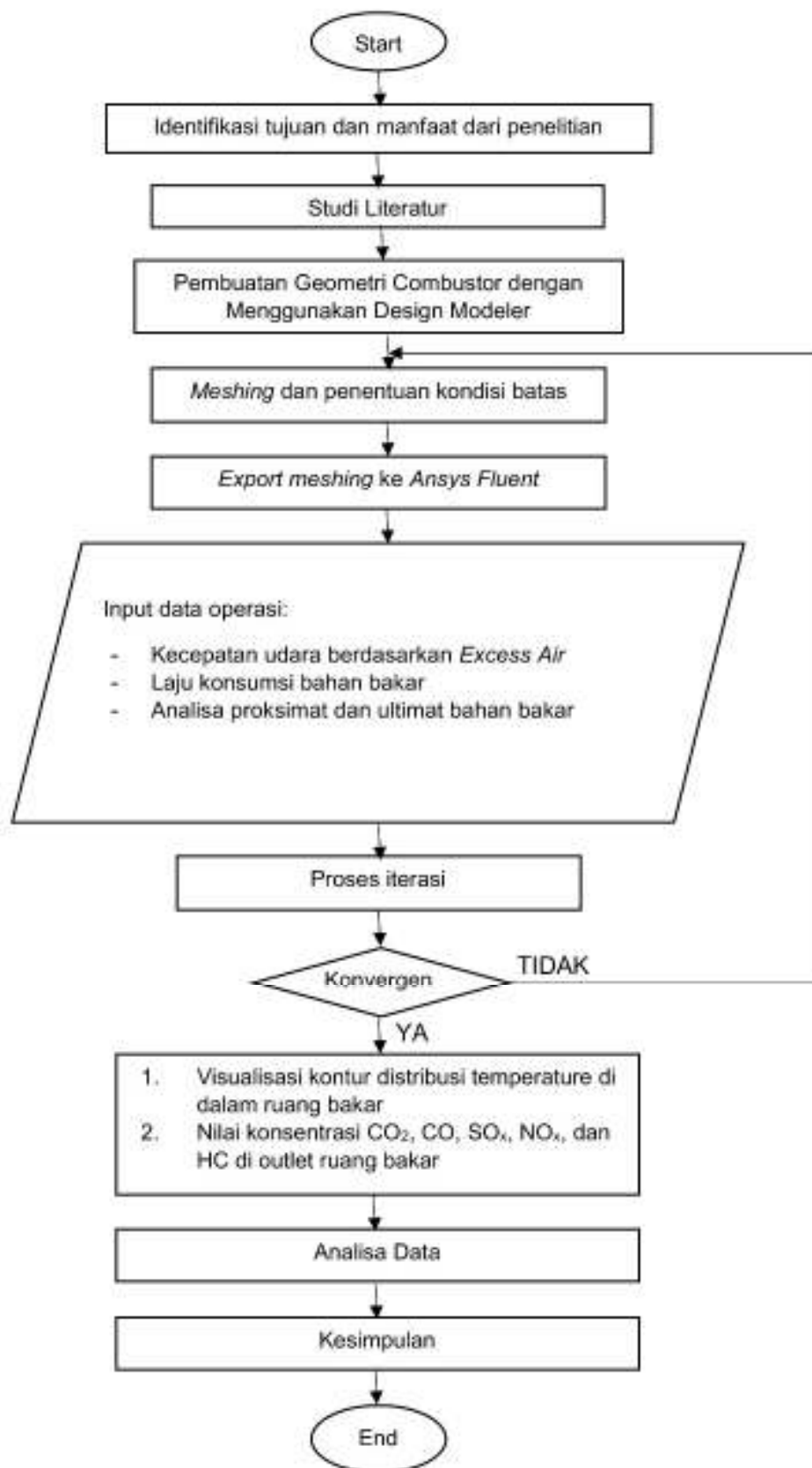
Pengumpulan data dilakukan untuk melakukan perhitungan, membuat pemodelan dan juga untuk validasi simulasi pembakaran.

3. Pemodelan dan Simulasi

Tahapan ini diawali dengan pre-processing pembuatan geometri dan penentuan domain sistem pembakaran di dalam combustion chamber. Pada tahap processing dan post-processing dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent.

#### 4. Analisis dan Kesimpulan

Pada akhir simulasi ditampilkan data post-processing dengan menampilkan hasil simulasi berupa distribusi temperatur dan konsentrasi emisi CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, dan NO<sub>x</sub>. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk menganalisa pengaruh variasi *Excess Air*, dan Rasio Campuran Bahan Bakar.



Gambar 3.1 Diagram alir kegiatan penelitian



## **3.2 Tempat dan Waktu Penelitian**

Adapun waktu dan tempat penelitian yang direncanakan adalah sebagai berikut:

### **3.2.1 Tempat Penelitian**

- Mengingat bahwa penelitian ini berbasis Software CFD dan dapat dilaksanakan dimana saja, maka penelitian dilaksanakan dengan tempat yang fleksibel.

### **3.2.2 Waktu Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan dengan rencana waktu 4 bulan, dimulai dari November 2021 sampai dengan bulan November 2023.

## **3.3 Pemodelan Campuran Bahan Bakar**

Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini merupakan Batu Bara Sub-Bituminous B dengan campuran Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Tertorefaksi. Campuran TKKS Tertorefaksi ke dalam Batu Bara Sub-Bituminous B menggunakan rasio 10%, 20% dan 30%.

Pemodelan campuran bahan bakar pada penelitian ini berdasarkan nilai ultimat dan proksimat Batu Bara Sub-bituminous B dan TKKS Tertorefaksi yang di dapat melalui uji kualitas bahan bakar. Berikut adalah data hasil uji

kualitas bahan bakar dari Batu Bara Sub-bituminous B dan TKKS Tertorefaksi.

Tabel 3.1 Hasil uji kualitas bahan bakar Batu Bara dan TKKS Tertorefaksi

SAMPSEL	ANALISIS ULTIMATE					ANALISIS PROKSIMAT			
	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	MC (%)	VM (%)	FC (%)	ASH (%)
BB-SBB	60,74	6,17	27,33	4,91	0,52	15,40	40,64	39,41	4,32
TKKS-TRF	52,78	5,89	39,79	1,58	-	6,33	65,77	20,90	7,00

SAMPSEL	NILAI KALOR (kcal/kg)	NILAI KALOR (J/kg)
BB-SBB	5.820,0	23.562.380
TKKS-TRF	5.035,0	21.083.970

Berdasarkan tabel 3.1, dilakukan pemodelan dengan perhitungan sederhana yakni mengalikan nilai proksimat, ultimat dan nilai kalor sesuai komposisi masing-masing sampel bahan bakar dan menjumlahkannya. Pada tabel 3.2 dapat kita lihat nilai proksimat dan ultimat untuk masing-masing rasio campuran bahan bakar.

Tabel 3.2 Sifat kima dari campuran bahan bakar

RASIO BAHAN BAKAR	ANALISIS ULTIMATE					ANALISIS PROKSIMAT				NILAI KALOR (J/kg)
	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	MC (%)	VM (%)	FC (%)	ASH (%)	
BB - SBB (100%)	60,74	6,17	27,33	4,91	0,52	15,40	40,64	39,41	4,32	23.562.380
TKKS - TRF (100%)	52,78	5,89	39,79	1,58	-	6,33	65,77	20,90	7,00	21.083.970
BB - SBB (90%)	59,94	6,14	28,58	4,58	0,47	14,49	43,15	37,56	4,59	23.314.539
BB - SBB (80%)	59,15	6,11	29,82	4,24	0,42	13,59	45,67	35,71	4,86	23.066.698
BB - SBB (70%)	58,35	6,09	31,07	3,91	0,36	12,68	48,18	33,86	5,12	22.818.860

### 3.4 Pemodelan Geometri *Pulverized Bed*

Pemodelan *pulverized bed* menggunakan software SolidWorks untuk membuat geometri *pulverized bed* dalam bentuk 3D. Pada gambar 3.2 bisa

kita lihat 3D model untuk *pulverized bed* yang akan digunakan sebagai geometri pada simulasi. Ruang bakar pada *pulverized bed* berbentuk kerucut dengan Panjang 80 cm, diameter outlet 7,6 cm, diameter pangkal burner 15 cm, diameter inlet bahan bakar dan udara primer 7,6 cm dan diameter udara sekunder 7,6 cm yang berada di dinding burner dengan jarak ke pangkal burner adalah 25 cm. Material yang digunakan untuk membuat ruang bakar ini adalah *carbon steel*.



Gambar 3.2 Geometri 3D *pulverized bed* yang akan digunakan pada simulasi co-firing

### 3.5 Laju Konsumsi Bahan Bakar, Rasio Pencampuran Bahan Bakar dan Kebutuhan Udara

Laju konsumsi bahan bakar yang ditentukan pada simulasi ini adalah 25 kg/jam atau setara dengan 6,9 gr/s.

Rasio pencampuran yang digunakan yang digunakan antara batu bara dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dapat dilihat pada table 3.1.

Suplai udara untuk pembakaran di ruang bakar dibagi melalui 2 (dua) inlet yakni inlet udara primer dan inlet udara sekunder, dimana inlet tersebut memiliki kecepatan masing-masing. Inlet udara primer memiliki kecepatan yang ditentukan untuk memenuhi kebutuhan udara stokiometrinya, dan inlet sekunder memiliki kecepatan udara sebagai *excess air*. Pada table 3.3 dapat dilihat nilai kecepatan udara yang ditentukan pada inlet primer dan inlet sekunder sesuai variable rasio pencampuran bahan bakar dan *excess air*.

Tabel 3.3 Variasi pencampuran bahan bakar, *excess air*, dan kebutuhan udara pada inlet primer dan sekunder

Rasio Bahan Bakar	Excess Air	Kecepatan Udara	
		Primer m/s	Sekunder m/s
A 100%	0	10,22	0,00
A 100%	10%	10,22	1,02
A 100%	20%	10,22	2,04
A 100%	30%	10,22	3,07
B 100%	0	7,92	0,00
B 100%	10%	7,92	0,79
B 100%	20%	7,92	1,58
B 100%	30%	7,92	2,38
A 90% + B 10%	0	9,99	0,00
A 90% + B 10%	10%	9,99	1,00
A 90% + B 10%	20%	9,99	2,00
A 90% + B 10%	30%	9,99	3,00
A 80% + B 20%	0	9,76	0,00
A 80% + B 20%	10%	9,76	0,98
A 80% + B 20%	20%	9,76	1,95
A 80% + B 20%	30%	9,76	2,93
A 70% + B 30%	0	9,53	0,00
A 70% + B 30%	10%	9,53	0,95
A 70% + B 30%	20%	9,53	1,91
A 70% + B 30%	30%	9,53	2,86

- \* A = Batu Bara
- B = TKKS Tertorefaksi
- C = TKKS

### 3.6 Tahapan Simulasi *Co-Firing*

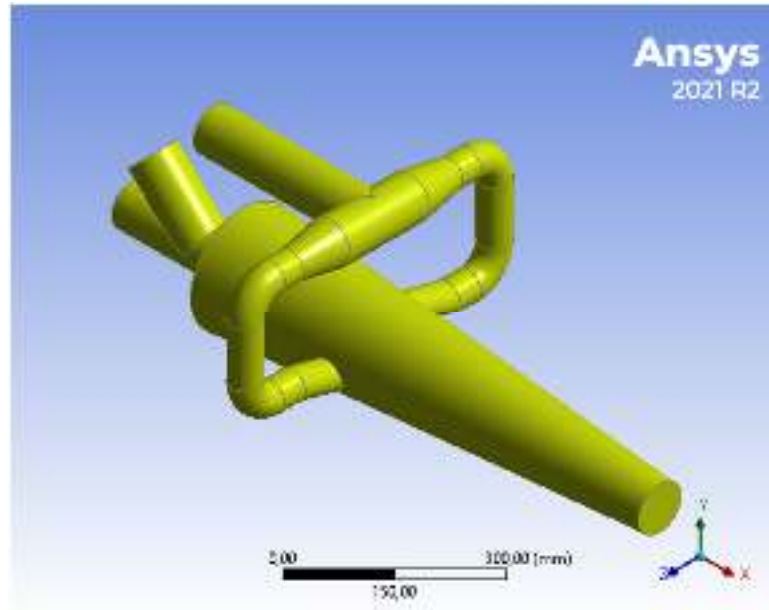
Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak *Ansys Fluent 2021 R2*. Tahap utama pemodelan dan simulasi ini ada 3 (tiga), yaitu pre-processing, processing dan post-processing. Penjelasan masing-masing tahapan sebagai berikut :

#### 3.6.1 *Pre-processing*

*Pre-processing* merupakan tahap dimana kita melakukan pendefinisian masalah. Pada tahap *pre-processing* ini ada 3 (tiga) langkah yang harus kita selesaikan sebagai berikut :

##### 1. Pembuatan geometri

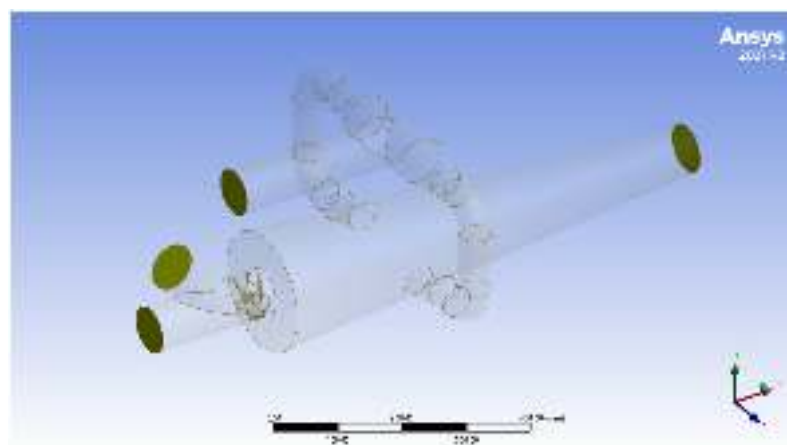
Geometri yang dipakai pada simulasi ini berbentuk bidang volume atau *body cell* dengan *import* 3D Model dari *software Solidworks* 2019. Pada langkah pembuatan geometri ini juga kita mendefinisikan geometri fluida dan solidnya. Pada Gambar 3.3 merupakan gambar pada penentuan geometry yang melibatkan sumbu x, y dan z.



Gambar 3.3 Geometri *pulverized bed* yang akan digunakan pada simulasi *co-firing*

## 2. Penentuan domain

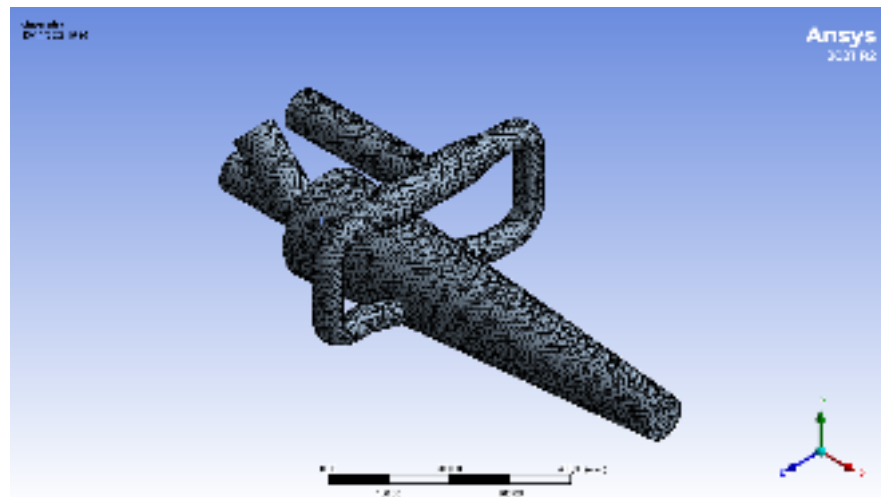
Lalu mendefinisikan *body* fluida, serta bidang untuk inlet bahan bakar, inlet udara primer, inlet udara sekunder, dan outlet burner. Pada gambar 3.4 dapat kita lihat proses penentuan domain untuk bidang inlet bahan bakar, udara primer, udara sekunder dan outlet burner.



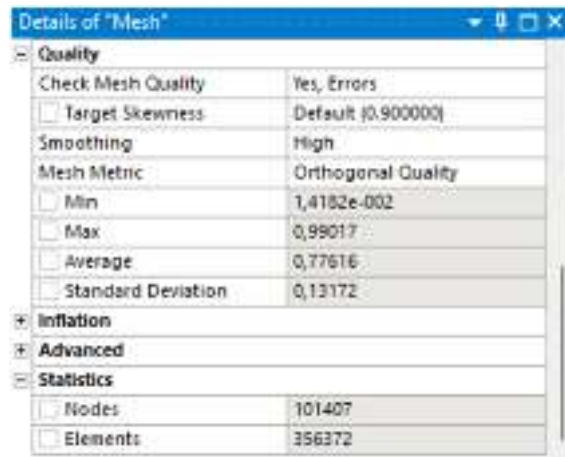
Gambar 3.4 Pendefinisian Domain

### 3. Pembuatan mesh dan grid

*Mesh* atau *grid* merupakan tahap *pre-processing* pada CFD yang sangat penting, proses mesh dapat mempengaruhi error tidaknya model simulasi CFD yang digunakan dan kualitas data yang didapatkan. Pada simulasi ini, digunakan mesh metric ***Orthogonal Quality*** dengan 101407 *nodes* dan 356372 *elements*. Pada gambar 3.5 dan 3.6 dapat kita lihat *detail* mesh atau grid yang digunakan pada simulasi ini.



Gambar 3.5 Hasil *meshing* pada geometri *pulverized bed*



Gambar 3.6 *Details of geometri pada pulverized bed*

### 3.6.2 *Processing* atau *Solver*

Pada tahap *processing*, didefinisikan persamaan yang akan digunakan pada simulasi, serta perlu mendefinisikan kondisi batas (*Boundary Condition*) yang sesuai dengan kondisi aslinya. Karena model simulasi merupakan kondisi ideal, sehingga terdapat beberapa variabel yang diasumsikan ideal. Berikut ini beberapa pengaturan pada perangkat lunak *Ansys Fluent* yang akan digunakan pada penelitian ini:

#### 1. Model

Secara umum, model numerik yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada table 3.4 dan gambar 3.7

Tabel 3.4 Model numerik yang digunakan pada simulasi *co-firing*

<b>MODELS</b>	<b>KETERANGAN</b>	<b>DASAR PEMIKIRAN</b>
Energy	On	Diperlukan untuk pembakaran
Viscous	SST k-omega	Untuk menyelesaikan masalah pembakaran dengan aliran turbulen
Species	Species Trsantport	Untuk menyelesaikan masalah transport dan reaksi multifasa
Discrete Phase	On	Diperlukan untuk setting tipe injection dan pembakaran termasuk evolusi <i>volatile</i> pada batu bara





## 2. Material

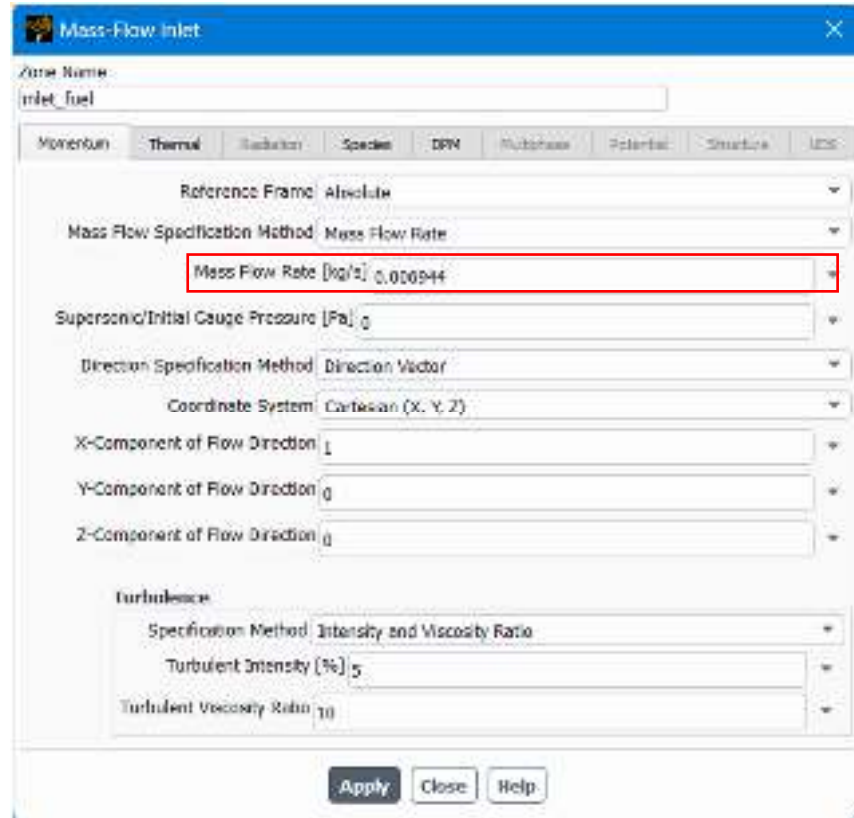
Material yang terlibat pada simulasi ini adalah *mixture, fluid, solid, droplet particle, dan combusting particle*. *Mixture* merepresentasikan material hasil pembakaran yang berupa *coal-volatiles-air* campuran terdiri dari zat volatile batu bara, sulfur dioksida, nitrogen, uap air, karbon dioksida, karbon monoksida dan oksigen. baradigunakan untuk mewakili meliputi material pada bahan bakar, udara, dan burner. *Fluid* merepresentasikan material udara yang digunakan pada inlet primer dan sekunder. *Solid* merepresentasikan dinding *pulverized bed*. *Droplet particle* merepresentasikan kandungan air pada bahan bakar yang ikut terbakar. *Combusting particle* merepresentasikan *properties* dari bahan bakar yang dipakai.

## 3. Boundary Condition

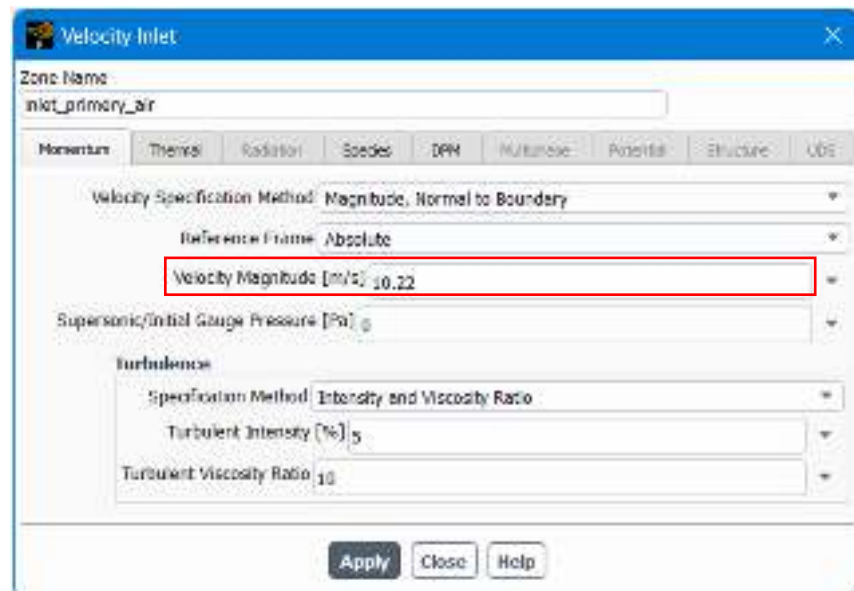
Laju konsumsi bahan bakar diatur sesuai kondisi aktual yakni 25 kg/jam. Data kecepatan udara pada inlet udara primer dan inlet udara sekunder disesuaikan dengan variasi *excess air* yang digunakan. Untuk outlet dimodelkan sebagai *pressure outlet* yang memiliki nilai 1 atm. Pada tabel 3.5 dapat kita lihat *boundary condition* dari variasi kecepatan udara di inlet primer dan sekunder.

Table 3.5 *Boundary condition* kecepatan udara primer dan sekunder.

Rasio Bahan Bakar	Excess Air	Kecepatan Udara	
		Primer m/s	Sekunder m/s
A 100%	0	10,22	0,00
A 100%	10%	10,22	1,02
A 100%	20%	10,22	2,04
A 100%	30%	10,22	3,07
B 100%	0	7,92	0,00
B 100%	10%	7,92	0,79
B 100%	20%	7,92	1,58
B 100%	30%	7,92	2,38
A 90% + B 10%	0	9,99	0,00
A 90% + B 10%	10%	9,99	1,00
A 90% + B 10%	20%	9,99	2,00
A 90% + B 10%	30%	9,99	3,00
A 80% + B 20%	0	9,76	0,00
A 80% + B 20%	10%	9,76	0,98
A 80% + B 20%	20%	9,76	1,95
A 80% + B 20%	30%	9,76	2,93
A 70% + B 30%	0	9,53	0,00
A 70% + B 30%	10%	9,53	0,95
A 70% + B 30%	20%	9,53	1,91
A 70% + B 30%	30%	9,53	2,86



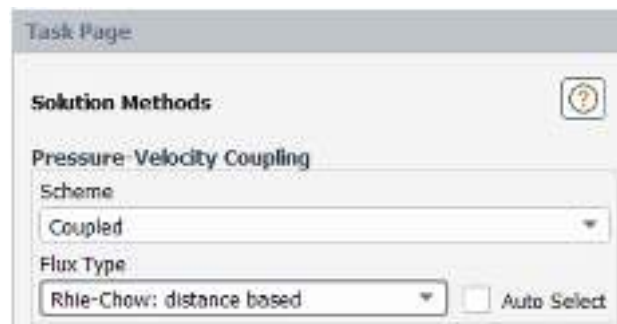
Gambar 3.9 *Input* laju konsumsi bahan bakar 0,006944 kg/s sebagai *boundary condition*



Gambar 3.10 *Input* kecepatan udara primer sebagai *boundary condition*

#### 4. *Solution*

Pada langkah ini kita akan menentukan *Solution Methods* dan *Flux Type* yang akan digunakan pada simulasi. Pada ***Pressure-Velocity Coupling*** dipilih skema ***Coupled*** yang menggunakan algoritma gabungan berbasis tekanan dapat memperoleh implementasi multifasa yang lebih kuat dan efisien untuk aliran *steady*. Pada ***Flux Type*** dipilih ***Rhie-Chow: distance based*** karena penggunaan interpolasinya cocok untuk simulasi aliran pembakaran.



Gambar 3.11 *Solution methods* pada software *Ansys Fluent*

#### 5. *Initialization*

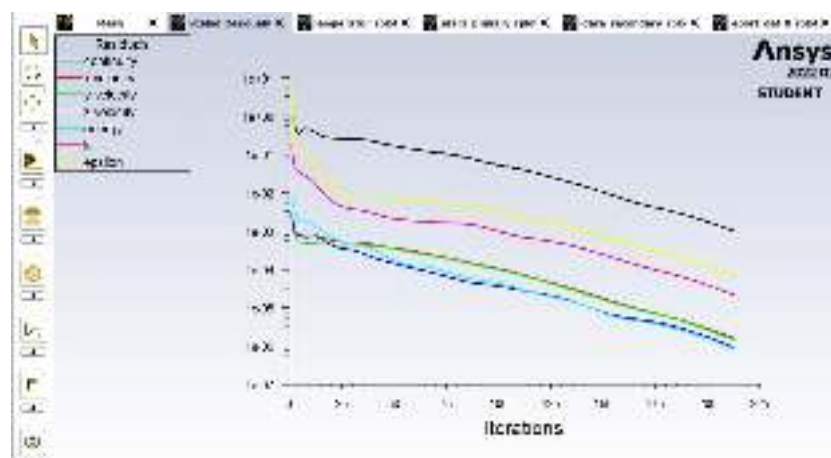
Initialize conditions merupakan nilai awal untuk tiap parameter sebelum proses iterasi untuk memudahkan simulasi mencapai konvergen. Initialize yang digunakan dalam simulasi ini adalah hybridinitialize, untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions* dari *inlet* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 *Initialization* menu

## 6. Monitoring Residual

Monitoring residual adalah tahap penyelesaian masalah berupa proses iterasi hingga mencapai harga konvergen yang diinginkan. Harga konvergen ditetapkan sebesar  $10^{-3}$ . Namun jika nilai konvergen tetap tidak tercapai maka untuk proses validasi dapat dilakukan pengambilan data pada iterasi tertentu dimana pada iterasi tersebut memiliki nilai parameter yang hampir sama dengan data operasi aktual.



Gambar 3.13 Grafik *residual*

### 3.6.3 *Post-Processing*

*Post-processing* merupakan tahap terakhir dalam simulasi ini. Pada tahap ini diperoleh hasil simulasi berupa data kualitatif berupa kontur atau vektor dan data kuantitatif berupa grafik maupun tabel data. Pada penelitian ini, analisa dilakukan terhadap distribusi temperatur dalam bentuk kontur, emisi hasil pembakaran (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan SO<sub>2</sub>) dalam bentuk grafik dan tabel, serta hydrocarbon yang tidak terbakar dalam bentuk grafik dan tabel. Pengamatan akan dilakukan terhadap masing-masing variasi.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi pada *co-firing* BB-SBB dan TKKS-TRF dengan *pulverized bed* dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan rasio TKKS-TRF mempengaruhi temperatur di dalam ruang bakar. Semakin banyak rasio TKKS-TRF di ruang bakar, temperatur cenderung menurun. Sedangkan kehadiran *excess air* berdampak pada naiknya temperatur di dalam ruang bakar. Temperatur rata-rata terendah ditemukan di bahan bakar BB-SBB 70% dengan tanpa kehadiran *excess air* (udara stoikiometri) yakni di 901 °C, dan temperatur rata-rata tertinggi ditemukan di bahan bakar BB-SBB 90% dengan *excess air* 30% yakni di 1172 °C.
2. Variasi geometri pada *pulverized bed* dengan inlet udara sekunder berjarak 25 cm dari pangkal burner memberikan turbulensi aliran yang lebih baik sehingga waktu tinggal bahan bakar di dalam ruang bakar lebih lama. Hal tersebut berdampak peningkatan terhadap temperature maksimum dan temperature rata-rata serta distribusi temperature lebih merata di dalam ruang bakar.



3. Penambahan TKKS-TRF pada bahan bakar dan *excess air* berhasil mereduksi konsentrasi CO dan HC pada outlet bahan bakar dan meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub>. Konsentrasi CO dan HC terendah sekaligus CO<sub>2</sub> tertinggi ditemukan pada BB-SBB 70% dengan *excess air* 30% yakni CO 3197 ppm, HC 1,6 %, dan CO<sub>2</sub> 1,6%.
4. Penambahan TKKS-TRF pada bahan bakar berhasil menurunkan kadar SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> pada outlet ruang bakar. SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> dapat menurun karena TKKS-TRF tidak memiliki kandungan sulfur dan memiliki kandungan Nitrogen lebih rendah dibandingkan BB-SBB. Sedangkan penambahan *excess air* berdampak pada teroksidasinya SO<sub>2</sub> menjadi SO<sub>3</sub> sehingga SO<sub>2</sub> menurun dan meningkatnya NO<sub>x</sub>.

## 5.2 Saran

Berdasarkan simulasi dan analisi yang telah dilakukan, maka untuk menyempurnakan penelitian selanjutnya perlu dilakukan saran-saran berikut:

1. Perlu dilakukan perubahan *design pulverized bed* dengan menambahkan cerobong agar pengukuran emisi dapat dilakukan di outlet cerobong untuk mengukur emisi di *flue gas*.
2. Perlu dilakukan simulasi dengan mempertimbangkan setting non adiabatik.
3. Perlu dilakukan simulasi untuk memprediksi *slagging* yang terjadi di ruang bakar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bach, Q. V., & Skreiberg, O. (2016). Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 665–677.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.014>
- Beagle, E.; Belmont, E. 2019. Comparative life cycle assessment of biomass utilization for electricity generation in the European Union and the United States. *Energy Policy*
- Cortez, L.A.B., Perez, L.E.B. 1997. *Experiences on Vinasse Disposal Part III : Combustion of Vinasse - #6 Fuel Oil Emulsions*. Braz. J. Chem. Eng. vol. 14 no. 1 Sao Paulo March. 1997
- Cutz, L.; Berndes, G.; Johnsson, F. 2019. A techno-economic assessment of biomass co-firing in Czech Republic, France, Germany and Poland. *Biofuels Bioprod. Biorefining*, 13, 1289–1305

Evans, A. M., Perschel, R. T., & Kittler, B. A. (2013). Overview of Forest Biomass Harvesting Guidelines. *Journal of Sustainable Forestry*, 32(1–2), 89–107. <https://doi.org/10.1080/10549811.2011.65178>

Fluent Inc. 2021. *Theory Guide*. Ansys Fluent 21 R2

Hansen, K. 2019. Decision-making based on energy costs: Comparing leveled cost of energy and energy system costs. *Energy Strategy*.

Himma, N.F., Arda, P.F. 2013. *Simulasi Pengaruh Kualitas Batubara pada Gasifikasi Batubara Berbasis CFD*. Tugas Akhir Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.

Hu, Z., Wang, X., Wang, Z., Wang, Y., & Tan, H. (2014). Segmented kinetic investigation on condensed kcl sulfation in SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O at 523-1023 K. *Energy and Fuels*, 28(12), 7560–7568. <https://doi.org/10.1021/ef502024q>

Kommalapati, R.R.; Hossan, I.; Botlaguduru, V.S.V.; Du, H.B.; Huque, Z. 2018. Life Cycle Environmental Impact of Biomass Co-Firing with Coal at a Power Plant in the Greater Houston Area.

Madanayake, B.N.; Gan, S.; Eastwick, C.; Ng, H.K. 2017. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. *Fuel Process. Technol*, 159, 287–305.

Marshall, E.M., Bakker, A., *Computational Fluid Mixing*, Fluent Inc. Lebanon, New Hampshire, USA, Reprinted, with changes, from the *Handbook of Industrial Mixing*, sponsored by the North American Mixing Forum, edited by Edward L. Paul, Victor Atiemo-Obeng, and Suzanne M. Kresta, to be published by John Wiley and Sons in Spring of 2003, copyright © 2003 John Wiley and Sons, Inc.

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(October 2017), 62–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.024>

Nasrin, A. B., Ma, A. N., Choo, Y. M., Mohamad, S., Rohaya, M. H., Azali, A., & Zainal, Z. (2008). Oil palm biomass as potential substitution raw materials for commercial biomass Briquettes production. *American Journal of Applied Sciences*, 5(3), 179–183.  
<https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.179.183>

Pratama, K.M., Hoedaya, Z.I.2013. *Pengaruh Karakteristik Turbulen Terhadap Profil Pembakaran di Inlet Burner Reaktor ZK*. Tugas Akhir Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI- ITS.

Purohit, P.; Chaturvedi, V. 2018. Biomass pellets for power generation in India: A techno-economic evaluation. *Environ. Sci. Pollut.* 25, 29614–29632

Shao, Y., Wang, J., Preto, F., Zhu, J., & Xu, C. (2012). Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation. *Energies*, 5(12), 5171–5189. <https://doi.org/10.3390/en5125171>

Triwibowo, B., Fitriady, M., A.2010. *Simulasi Proses Pembakaran pada Kiln Semen Berbasis CFD*. Tugas Akhir Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI- ITS.

Warnatz. J., Ulrich. M., Dibble. R.W. 2006. *Combustion : Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutan Formation 4th edition*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2006.

Xu, J.P.; Huang, Q.; Lv, C.G.; Feng, Q.; Wang, F.J. 2018. Carbon emissions reductions oriented dynamic equilibrium strategy using biomass-coal co-firing. *Energy Policy*

C. Zhu, H. Tu, Y. Bai, D. Ma, and Y. Zhao, "Evaluation of slagging and fouling characteristics during Zhundong coal co-firing with a Si/Al dominated low rank coal," *Fuel*, vol. 254, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115730