

**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN LAJU ALIRAN UDARA PADA
TUNGKU *PULVERIZED BURNER* DENGAN PENAMBAHAN
SECONDARY AIR MENGGUNAKAN METODE CFD**

(Skripsi)

Oleh

Alifiandi Laksana

NPM 1915021043



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN LAJU ALIRAN UDARA PADA TUNGKU *PULVERIZED BURNER* DENGAN PENAMBAHAN *SECONDARY AIR* MENGGUNAKAN METODE CFD

Oleh

Alifiandi Laksana

Pulverized coal boiler adalah teknologi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang masih banyak digunakan di Indonesia. Salah satu proses penting dalam sistem PLTU adalah pembakaran bahan bakar. Pembakaran bahan bakar umumnya menggunakan *pulverized burner*. Peningkatan efisiensi pembakaran pada *pulverized burner* menjadi bagian penting dalam pembangkitan daya. Efisiensi pembakaran pada *pulverized burner* dapat diamati salah satunya dengan simulasi distribusi temperatur dan laju aliran udara. Simulasi dinilai lebih aman sehingga lebih menguntungkan dari segi biaya dan keselamatan pekerja. Agar aliran dalam *pulverized burner* lebih turbulen perlu ditambahkan *secondary air*. Penelitian ini membandingkan pengaruh tanpa *excess air*, dengan *excess air* 10, 20, dan 30% terhadap distribusi temperatur dan laju aliran udara. Pada proses simulasi dilakukan *meshing*, *setup* dan *processing* untuk mendapatkan hasil distribusi temperatur dan laju aliran udara. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan udara sekunder terhadap distribusi temperatur pada burner lebih merata. Selain itu, penambahan udara sekunder pada laju aliran udara di dalam burner meningkatkan turbulensi aliran yang lebih tinggi saat pembakaran, dan diperoleh nilai kecepatan udara tertinggi sebesar 19,81 m/s pada *excess air* 30%.

Kata kunci: *pulverized burner*, simulasi, *excess air*, udara sekunder

ABSTRACT

SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AND AIR FLOW RATE IN PULVERIZED BURNER FURNACE WITH THE ADDITION OF SECONDARY AIR USING CFD METHOD

By

Alifiandi Laksana

Pulverized coal boiler is a steam power plant (PLTU) technology that is still widely used in Indonesia. One of the important processes in the PLTU system is fuel combustion. Fuel combustion generally uses pulverized burners. Improving combustion efficiency in pulverized burners is an important part of power generation. Combustion efficiency in pulverized burners can be observed by simulating the temperature distribution and air flow rate. Simulation is considered safer so that it is more profitable in terms of cost and worker safety. In order to make the flow in the pulverized burner more turbulent, secondary air needs to be added. This study compares the effect of no excess air, with excess air of 10, 20, and 30% on temperature distribution and air flow rate. In the simulation process, meshing, setup and processing are carried out to obtain the results of temperature distribution and air flow rate. The simulation results show that the addition of secondary air to the temperature distribution on the burner is more even. In addition, the addition of secondary air to the air flow rate in the burner increases higher flow turbulence during combustion, and the highest air velocity value of 19.81 m/s is obtained at 30% excess air.

Keywords: Pulverized burner, simulation, excess air, secondary air

**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN LAJU ALIRAN UDARA PADA
TUNGKU *PULVERIZED BURNER* DENGAN PENAMBAHAN
SECONDARY AIR MENGGUNAKAN METODE CFD**

Oleh

ALIFIANDI LAKSANA

NPM 1915021043

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

**Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR
DAN LAJU ALIRAN UDARA
PULVERIZED BURNER DENGAN
PENAMBAHAN *SECONDARY AIR*
MENGUNAKAN METODE CFD

Nama Mahasiswa : Alifiandi Laksana

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021043

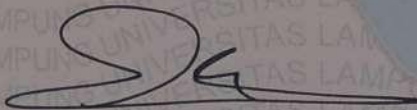
Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI
Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota



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



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

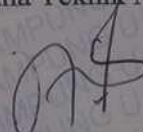
MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
Sarjana Teknik Mesin



Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 1970331 199903 1 003

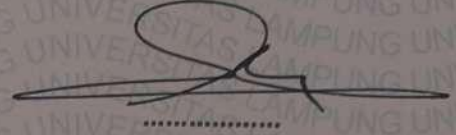


Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP. 19701104 199703 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

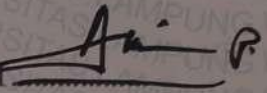
Ketua Penguji : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**



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



Penguji Utama : **Ir. A Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng., IPM**



2. Dekan Fakultas Teknik



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



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 18 Juli 2023

LEMBAR PERNYATAAN

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

Bandar Lampung, Agustus 2023

Yang Membuat

A handwritten signature in black ink is written over a yellow revenue stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'METERAI TEMPEL' and '8F331AKX540073599'.

METERAI
TEMPEL
8F331AKX540073599

Alifiandi Laksana
NPM 1915021043

MOTTO

“Saya hanya ingin melakukan yang terbaik yang saya bisa setiap saat.”

(Max Verstappen)

“Tidak peduli seberapa banyak kesalahan yang Anda buat atau seberapa lambat kemajuan Anda, Anda masih jauh di depan semua orang yang tidak mencoba ”

(Tony Robbins)

“Rahasia kebahagiaan: Temukan sesuatu yang lebih penting dari diri Anda dan dedikasikan hidup Anda untuk itu ”

(Daniel C. Dennett)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

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

Skripsi yang berjudul “Simulasi Distribusi Temperatur Dan Laju Aliran Udara Pada Tungku *Pulverized Burner* Dengan Penambahan *Secondary Air* Menggunakan Metode CFD” ini penulis susun untuk syarat memperoleh gelar sarjana di Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penyelesaian Skripsi ini tentu tidaklah lepas dari bantuan, bimbingan, dukungan serta semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan Terima kasih kepada:

1. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Dr. Amrul, S.T., M.T., sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung sekaligus sebagai Dosen Pembimbing I penulis yang telah memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.
3. Novri Tanti, S.T., M.T., sebagai Ketua Program Studi Sarjana Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Hadi Prayitno, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing II penulis yang telah memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.
5. Ir. A Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng., IPM., sebagai Dosen Pembahas yang

telah memberikan penulis saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.

6. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Sarjana Teknik Mesin atas segala ilmu yang bermanfaat, waktu dan tenaga yang diberikan untuk penulis.
7. Kepada Untung Laksana dan Siti Fatimah sebagai kedua Orang Tua yang selalu menyemangati dan memberikan dukungan serta do'a yang tak terbatas.
8. Teman-teman tim penelitian *Co-firing* dan Torefaksi, Almer Ellian Farrel, Andreas Novendra Dwiyanto Marbun, Fadhlán'Azhim, Ihsan Restu Maulana Supriatna, Muhammad Ardy Yusuf, Muhammad Hafid, Muhamamd Yuda Prasetyo Nugroho, Rifqi Fauzan Hakim, Risky M. Desnal, Rizki Kurniawansah, Prengki, Mas Ali Mustofa dan Mas Machfud Kurnia Akbar yang telah membantu penyelesaian Skripsi ini.
9. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan 2019 yang telah memberikan bantuan dan dukungannya kepada penulis.
10. Dinul Aliya Julianti yang telah sedia memberikan doa, dukungan, dan waktunya, baik secara materi, maupun emosonal kepada penulis selama proses penyelesaian skripsi ini.
11. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa Skripsi 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 skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Wassalamu 'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, Agustus 2023

Penulis,

Alifiandi Laksana

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Malimping, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten pada tanggal 24 Oktober 2000 sebagai anak tunggal, dari pasangan Bapak Untung Laksana dan Ibu Siti Fatimah. Penulis menempuh Pendidikan Dasar di SD NEGERI 21 KOTA SERANG hingga tahun 2013, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 15 KOTA SERANG yang diselesaikan tahun 2016 dan SMA NEGERI 2 KOTA SERANG yang diselesaikan tahun 2019, hingga pada tahun 2019 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota bidang dana kewirausahaan periode 2020-2021 dan anggota bidang edukasi dan kemahasiswaan periode 2021-2022. Selain aktif dalam HIMATEM, penulis pernah mengikuti program Studi Independen Bersertifikat Kampus Merdeka Angkatan 3 di PT. CADFEM ANSYS INDONESIA. Bidang Computational Fluids Dynamic (CFD) selama 6 bulan.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di **PT. PGN LNG Tbk. Stasiun Labuhan Maringgai**, Labuhan Maringgai, Lampung Timur tahun 2022 dengan judul laporan “**ANALISIS EFISIENSI ISENTROPIK KOMPRESOR SEKRUP MODEL UNIT SULLAIR WS3710 PT PGN LNG INDONESIA OFFTAKE STASION/ONSHORE RECEIVING FACILITY STASIUN LABUHAN MARINGGAI**”

Tahun 2023 penulis melakukan penelitian yang tergabung dalam tim *Co-firing* dengan judul Penelitian “**SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN LAJU ALIRAN UDARA PADA TUNGKU PULVERIZED BURNER DENGAN MENGGUNAKAN**

METODE CFD” dibawah bimbingan Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Hadi Prayitno, S.T.,
M.T.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Boiler.....	7
2.2 <i>Pulverized Coal Combustion</i>	8
2.2.1 Jenis Sistem Pembakaran <i>Pulverized</i>	9
2.3 Batu bara.....	11
2.3.1 Analisis Basis Dasar	12
2.3.2 Analisis Proksimat.....	13
2.3.3 Analisis Ultimat.....	13
2.3.4 Nilai Kalor.....	14
2.3.5 Grindabilitas	14
2.3.6 Susunan Sulfur Batu bara	14
2.3.7 <i>Free-swelling Index</i>	15
2.3.8 <i>Ash Fusion Temperatures</i>	15
2.3.9 Komposisi Abu.....	15
2.4 Pembakaran.....	15
2.4.1 Reaksi Pembakaran	16
2.4.3 Pembakaran Tiga T	17
2.4.4 Pembakaran Stoikiometri Kebutuhan Udara.....	18
2.4.4 Pembakaran Non Stokiometri	19
2.5 Udara Pembakaran	20

2.5.1 Campuran Udara-Bahan Bakar	21
2.6 Emisi Proses Pembakaran	23
2.7 Simulasi pada <i>Pulverized Burner</i>	24
2.7.1 Persamaan Kekekalan Massa	24
2.7.2 Persamaan Kekekalan Momentum (Navier-Stokes)	25
2.7.3 Persamaan Kekekalan Energi.....	25
III. METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Tahapan Penelitian.....	26
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	27
3.2.1 Tempat Penelitian.....	27
3.2.2 Waktu Penelitian	27
3.3 Diagram Alir Metode Penelitian.....	28
3.4. Perancangan Desain <i>Pulverized Burner</i>	30
3.5 Kebutuhan Udara Primer & Udara Sekunder	31
3.6 Tahap Simulasi	33
3.6.1 <i>Pre-Processing</i>	33
3.6.2 <i>Processing</i>	37
3.6.2.3 <i>Boundary Conditions</i>	39
3.6.2.4 <i>Operating Conditions</i>	40
3.6.2.5 <i>Solution</i>	41
3.6.2.6 <i>Initialize Conditions</i>	41
3.6.2.7 <i>Monitoring Residual</i>	42
3.6.3 <i>Post-processing</i>	43
IV. HASIL DAN PEMBAHASAHAN	44
4.1 Properties Kebutuhan Udara	45
4.2 Proses Simulasi	45
4.3 Analisa Hasil Simulasi.....	48
4.3.1 Distribusi Kecepatan Udara	49
4.3.2 Distribusi Temperatur	54
4.3.3 Distribusi Tekanan	59
V. PENUTUP	64
5.1 Kesimpulan	64

5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tipe pembakaran serbuk	10
Gambar 2.2 Skema pembentukan batu bara berdasarkan peringkat	11
Gambar 2.3 Analisis basis dasar batu bara.	13
Gambar 2.4 Pembakaran yang sempurna, baik, dan tidak sempurna.....	18
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	29
Gambar 3.2 Skema pulverized burner.....	30
Gambar 3.3 Blower sekunder.....	32
Gambar 3.4 Proses impor geometri dari perangkat lunak menggambar.....	34
Gambar 3.5 Proses pembuatan domain fluida	35
Gambar 3.6 Hasil meshing pulverized burner	36
Gambar 3.7 Penentuan domain inlet burner.....	36
Gambar 3.8 Penentuan domain outlet burner.....	37
Gambar 3.9 Pemilihan material simulasi	39
Gambar 3.10 Boundary condition menu	40
Gambar 3.11 Metode solusi simulasi.....	41
Gambar 3.12 Initialization menu	42
Gambar 3.13 Tahapan iterasi	43
Gambar 4.1 Hasil meshing burner.	45
Gambar 4.2 Grafik iterasi tanpa udara berlebih.....	46
Gambar 4.3 Grafik iterasi excess air 10%.....	47
Gambar 4.4 Grafik iterasi excess air 20%.....	47
Gambar 4.5 Grafik hasil iterasi excess air 30%	48
Gambar 4.6 Distribusi kontur kecepatan aliran udara tanpa udara berlebih.....	49
Gambar 4.7 Distribusi kontur kecepatan aliran udara excess air 10%.....	50
Gambar 4.8 Distribusi kontur kecepatan aliran udara excess air 20%.....	51
Gambar 4.9 Distribusi kontur kecepatan aliran udara excess air 30%.....	52
Gambar 4.10 Grafik kecepatan udara pada outlet burner	53
Gambar 4.11 Kontur temperatur burner tanpa udara berlebih.....	54
Gambar 4.12 Kontur temperatur burner variasi excess air 10%	55
Gambar 4.13 Kontur temperatur burner variasi excess air 20%	56

Gambar 4.14 Kontur temperatur burner dengan variasi excess air 30%.....	57
Gambar 4.15 Grafik distribusi temperatur burner.....	58
Gambar 4.16 Distribusi kontur tekanan burner variasi tekanan 40 kPa.....	59
Gambar 4.17 Distribusi kontur tekanan burner variasi tekanan 60 kPa.....	60
Gambar 4.18 Distribusi kontur tekanan burner variasi tekanan 80 kPa.....	61
Gambar 4.19 Distribusi tekanan burner variasi tekanan 100 kPa.....	62
Gambar 4.20 Grafik distribusi tekanan burner.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan antara Keempat Jenis Boiler	8
Tabel 2.2 Bentuk Reaksi Kimia Bahan Bakar	17
Tabel 2.3 Komposisi Udara di Atmosfer	20
Tabel 3.1 Perhitungan kebutuhan udara pembakaran.....	33
Tabel 3.2 Model yang digunakan dalam simulasi pulverized burner.....	38
Tabel 3.3 Tekanan Operasi Simulasi	40
Tabel 4.1 Properties kebutuhan udara	44

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi berbasis bahan bakar fosil yang digunakan di Indonesia saat ini masih menduduki peringkat teratas menjadi sumber energi primer bagi industri, kebutuhan rumah tangga, transportasi dan lain sebagainya. Jenis energi primer yang mendominasi salah satunya adalah batu bara yaitu sekitar 38,5% dari total konsumsi energi primer nasional. Batu bara sebagian besar digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik di Indonesia. Realisasi konsumsi listrik nasional sebesar 255 TWh pada tahun 2021, sedangkan kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia mencapai 83.888 MW pada tahun 2022 dibandingkan 76.661 MW tahun 2021(Dewan Energi Nasional, 2022).

Dari data tersebut, sebagian besar pembangkit listrik di Indonesia masih didominasi oleh pembangkit listrik bahan bakar batu bara, baik yang menggunakan nilai kalori tinggi maupun batu bara nilai kalori rendah (*low rank coal*). Dalam jangka panjang, pasokan batu bara semakin berkurang, sehingga diperlukan langkah-langkah konkrit dalam mereduksi pemakaian bahan bakar tersebut dan menggantinya dengan bahan bakar alternatif yang ramah terhadap lingkungan. Dalam rangka mendukung pencapaian target bauran energi terbarukan, pemerintah menargetkan pencapaian energi baru terbarukan dalam bauran energi nasional yang tertuang pada Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) mencapai 23% pada tahun 2025 yang di *break down* menjadi listrik dan non listrik (Peraturan Presiden RI, 2017). Pada tahun 2021, penerapan EBT masih jauh dari target yaitu sebesar 15% terdapat deviasi sebesar 8% yang harus diimplementasikan dalam 4 tahun kedepan (PLN, 2021).

Penggunaan bahan bakar batu bara sebagai bahan bakar pembangkit listrik melepaskan emisi gas karbondioksida (CO₂) ke udara sebesar 48% dari total emisi berbagai sektor di Indonesia pada tahun 2022 (Dewan Energi Nasional, 2022). Gas karbondioksida (CO₂) menyebabkan sejumlah permasalahan lingkungan seperti meningkatnya efek gas rumah kaca yang berkaitan langsung dengan pemanasan global. Komitmen pemerintah dalam mengurangi emisi gas rumah kaca berdasarkan Paris Agreement-2015, dimana Indonesia berkomitmen mengurangi emisi gas rumah kaca sebanyak 29% (834 juta ton CO₂) dengan usaha sendiri dan 41% (1.081 juta ton CO₂) dengan bantuan internasional pada tahun 2030 (KESDM, 2020).

Hal inilah yang membuat pembangkit listrik tenaga uap dituntut untuk terus melakukan pengembangan teknologinya agar mendapat efisiensi pembakaran yang tinggi serta dapat meminimalisir potensi terbentuknya emisi yang berbahaya bagi lingkungan. Saat ini teknologi boiler yang masih banyak digunakan di Indonesia adalah *pulverized coal boiler*. *Pulverized coal (PC) boiler* memiliki beberapa kelebihan yaitu dapat menggunakan beberapa jenis batu bara, sensitif terhadap perubahan beban, suhu pembakaran yang lebih tinggi, dan kebutuhan udara berlebih yang lebih rendah untuk pembakaran. *Pulverized coal boiler* menggunakan bahan bakar batu bara. Sebelum masuk kedalam ruang bakar batu bara terlebih dahulu dihaluskan hingga berdiameter rata-rata 50µm. Udara pembakaran pada *pulverized boiler* terdiri dari dua jenis yaitu *primary air* dan *secondary air*. *Primary air* berfungsi sebagai pembawa batu bara serbuk (*pulverized coal*) yang diumpahkan ke dalam burner sehingga peran udara primer dalam pembakaran batu bara sangat penting. Kebutuhan udara primer pada pembakaran serbuk (*pulverized coal*) sebesar 40-70% dari debit udara total. Sedangkan *secondary air* adalah udara yang diumpahkan pada ketinggian tertentu dari burner, sebagai pasokan tambahan udara pembakaran (Ronaldo dkk, 2021).

Sejauh ini usaha untuk meningkatkan kemampuan dan efisiensi pengoperasian boiler dilakukan dengan cara uji coba berdasarkan referensi buku manual operasi di lapangan. Namun metode ini memiliki keterbatasan diantaranya adalah langkah-langkah operasi tidak dapat dilakukan dengan fleksibel karena kendala faktor keamanan pengoperasian unit, kesalahan pada perubahan parameter operasi akan berdampak terhadap faktor keamanan operator dan unit pembangkit. Untuk menghindari hal ini diperlukan metode lain yang lebih aman dan fleksibel tanpa mempengaruhi kondisi operasi secara langsung. Metode lain yang dapat digunakan adalah simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dengan simulasi ini, pengguna dapat mengetahui dampak langsung terhadap kondisi operasi di lapangan dan dapat mengetahui fenomena yang terjadi di dalam boiler yang sulit diamati secara langsung, sehingga analisa dapat dilakukan lebih mendalam, terukur dan lebih aman.

Pada hasil penelitian tentang simulasi penambahan *secondary air* pada *pulverized boiler* terhadap slagging yang dilakukan oleh Zhao dan Wang. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya suhu udara sekunder, intensitas pembakaran pembakar meningkat. Selain itu, juga dapat ditemukan bahwa dengan meningkatkannya suhu udara sekunder, kandungan CO₂ juga meningkat selama proses pembakaran. Bermanfaat untuk mengontrol pembentukan NO_x polutan (Zhao dkk, 2021).

Berdasarkan studi literatur yang dilakukan oleh peneliti, penelitian mengenai simulasi *pulverized burner* dengan penambahan *secondary air* khususnya di Indonesia belum banyak dilakukan. Dengan demikian peneliti tertarik melakukan penelitian tentang simulasi *pulverized burner* dengan penambahan *secondary air*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan *secondary air* dalam distribusi temperatur di dalam *burner*?
2. Bagaimana pengaruh penambahan *secondary air* terhadap laju kecepatan udara di dalam *burner*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh *secondary air* terhadap distribusi temperatur yang terjadi di dalam *burner*.
2. Mengetahui pengaruh *secondary air* terhadap laju kecepatan udara yang terjadi di dalam *burner*.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian perancangan *pulverized burner* ini, dilakukan pembatasan masalah dengan ruang lingkup sebagai berikut:

1. *Pulverized burner* dirancang sebagai alat pengujian pembakaran bahan bakar padat.
2. Temperatur pembakaran bahan bakar di *burner* sekitar 850°C.
3. Laju aliran udara menggunakan *primary air* dan *secondary air*.
4. Kecepatan angin *primary* sebesar 7,26 m/s dan variasi kecepatan angin *secondary air* yaitu *excess air* 0% , *excess air* 10% , *excess air* 20% dan *excess air* 30%.
5. Membuat geometri *secondary air* menggunakan perangkat lunak menggambar.
6. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 2022 R2 *Students*.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan latar belakang dilakukannya penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan berupa format yang dipakai pada penulisan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini bersikan tentang landasan teori yang digunakan dalam menyusun penelitian serta sebagai acuan dalam membahas hasil pengujian yang diperoleh, materi yang terdapat dalam penelitian ini berasal dari buku, jurnal, dan literatur yang terpercaya.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisikan metode yang digunakan dalam melakukan pengumpulan data selama penelitian berlangsung dan menerangkan alur penelitian serta bagaimana mengumpulkan data dan informasi yang diperlukan untuk penyusunan laporan penelitian.

IV. DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan analisa dan pembahasan data-data yang diperoleh selama kegiatan penelitian berlangsung.

V. PENUTUP

Pada bab ini berisikan kesimpulan yang diperoleh dari data dan pembahasan serta saran yang dapat diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan selama penyusunan laporan penelitian.

LAMPIRAN

Berisikan data hasil pengujian, foto perlengkapan dan spesifikasi tertentu yang diperoleh selama penelitian berlangsung.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

Boiler atau yang juga dikenal dengan *steam generator* adalah suatu peralatan yang sangat penting dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi untuk menghasilkan uap dengan memanfaatkan energi panas yang diperoleh dari pembakaran bahan bakar. Berdasarkan tipe pengapiannya (*firing*) boiler dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, antara lain (Basu, 2015):

1. *Stocker-fired boiler*

Jenis boiler ini menggunakan rantai berjalan sebagai tempat pembakaran bahan bakar yang umumnya berupa padatan. Udara panas ditiupkan dari bawah rantai hingga bahan bakar seperti batu bara, terbakar. Boiler jenis ini dapat menggunakan bahan bakar batu bara, limbah kayu, ataupun sampah anorganik.

2. *Pulverized coal boiler*

Pada boiler ini batu bara yang digunakan untuk bahan bakar digiling terlebih dahulu menjadi serbuk menggunakan *mill* sebelum diumpankan ke ruang bakar.

3. *Fluidized bed combustion (FBC) boiler*

Prinsip kerja FBC boiler hampir sama dengan boiler stoker mekanik, namun tidak menggunakan rantai, akan tetapi menggunakan tumpukan (*bed*) partikel pasir yang diletakan di dalam ruang bakar sebagai media penyimpan energi panas yang memacu batu baru untuk terus terbakar. Udara dengan tekanan dan kecepatan yang tinggi dihembuskan dari nozzle-nozzle yang berada pada dasar ruang bakar. Udara inilah yang akan membuat *bed* (partikel pasir) dan bahan bakar terus melayang dan berolak di dalam ruang bakar untuk mencapai efisiensi pembakaran yang baik.

Fluidized Bed Combustion (FBC) boiler sendiri dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan mekanisme kerjanya, yaitu *Bubbling FBC* (BFBC) dan *Circulating FBC* Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan antara *Stocker-Fired Boiler*, *Pulverized Fuel Boiler*, *Bubbling FBC Boiler*, dan *Circulating FBC Boiler*.

Tabel 2.1 Perbandingan antara keempat jenis boiler (Basu, 2015)

<i>Chacteristics</i>	<i>Stocker</i>	<i>Pulverized</i>	<i>Bubbling</i>	<i>Circulating</i>
<i>Height of furnace (m)</i>	0.2	27-45	1-2	15-40
<i>Grate heat-release rate (MW/m²)</i>	0.5-1.0	4-6	0.5-1.5	3-5
<i>Coal size (mm)</i>	6-32	<0.1	0-10	0-10
<i>Combustion efficiency (%)</i>	85-90	99-99.5	90-96	95-99.5
<i>Nitrogen oxide (ppm)</i>	400-600	400-600	300-400	50-200
<i>Sulfur dioxide capture in furnace (%)</i>	<i>None</i>	<i>None</i>	80-90	80-95

2.2 *Pulverized Coal Combustion*

Pulverized coal combustion pertama kali dikenalkan sekitar 1920 dimana mulai digunakan secara luas di dunia industri. Ide dasar dari *pulverized combustion* ini adalah batu bara digiling hingga halus seperti tepung, batu bara akan mengalir melalui pipa batu bara seperti minyak dan akan terbakar di dalam ruang tungku semudah dan seefisien gas. Pembakaran batu bara diruang tungku dalam waktu yang sangat singkat (12 detik) sejak partikel batu bara diinjeksikan kedalam tungku. Proses penghalusan batu bara meliputi dua tahap. Tahap pertama, batu bara mentah dihancurkan menjadi ukuran tidak lebih dari 15-25 mm. Batu bara yang telah dihancurkan kemudian dikirim ke dalam bunker batu bara mentah dan dipindahkan ke *pulverizer*, di mana batu bara tersebut digiling menjadi ukuran partikel yang halus (Sarkar, 2015).

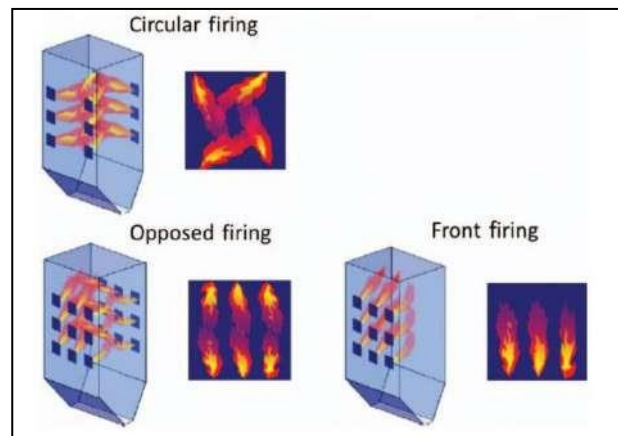
Untuk pembakaran yang efisien dari batu bara serbuk, ada dua faktor dasar yang perlu dipertimbangkan (Sarkar, 2015):

1. Batu bara bubuk harus diumpankan tanpa pemisahan, dan;
2. Campuran batu bara bubuk dan udara yang diumpankan ke burner harus memungkinkan penyalaan yang stabil.
3. Pembakaran sempurna dari partikel batu bara bubuk tergantung pada sifat fisik dan sifat kimiawi dari arang yang dihasilkan, desain boiler, dan kondisi operasi boiler.

Selama pembakaran partikel batu bara, mekanisme reaksi antara karbon dan oksigen terjadi dalam dua tahap. Oksigen teradsorpsi pada permukaan partikel dan bereaksi secara kimiawi dengan karbon membentuk CO. Karbon monoksida kemudian bereaksi dengan oksigen di dalam lapisan gas batas untuk dioksidasi menjadi CO₂.

2.2.1 Jenis Sistem Pembakaran *Pulverized*

Sistem penembakan batu bara serbuk ditunjukkan Gambar 2.1. Prinsip dasarnya adalah pencampuran bahan bakar dan udara pembakaran dengan menggunakan efek jet, efek pusaran, dan efek eddy. Ini mirip dengan desain pembakar apa pun. Namun, karena konsep dan konfigurasi desain burner sangat bergantung pada desain tungku seperti distribusi fluks panas, sirkulasi air, jenis bahan bakar, dll. Sistem pembakaran tipikal untuk bahan bakar padat, cair dan gas adalah penembakan sudut melingkar terutama menggunakan aliran parallel dan penembakan dinding terutama menggunakan aliran konsentris dengan pusaran (Ozawa & Asano, 2021).



Gambar 2. 1 Tipe pembakaran serbuk (Ozawa, 2021)

2.2.1.1 Sistem Tembakan Sudut Melingkar

Pembakaran terletak di dekat setiap sudut. Bahan bakar dan udara diinjeksikan secara tangensial ke lingkaran pusat virtual di dalam tungku sehingga membentuk pusaran api yang besar. Untuk boiler kelas 1000 MW, dua pusaran api besar yang berputar searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam, masing-masing terbentuk dalam tungku tanpa dinding partisi. Satu set burner terdiri dari satu kompartemen bahan bakar dan dua komponen udara pembakaran yang disusun secara vertikal dengan satu set burner lainnya. Sebagian udara pembakaran juga diinjeksikan ke tungku di sekitar nosel bahan bakar di ruang bakar. Kecepatan injeksi dan distribusi udara dari masing-masing nosel dirancang untuk membuat nyala api individu yang relatif panjang untuk membentuk nyala api pusaran yang besar di dalam tungku.

2.2.1.2 Penembakan Dinding

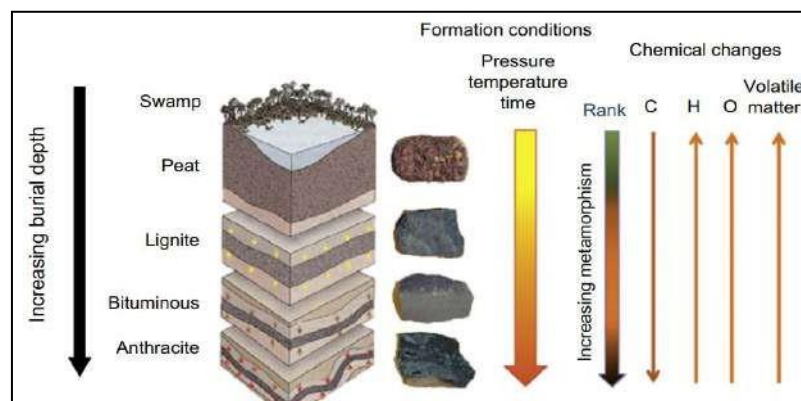
Pembakar diatur dalam barisan di dinding depan dan belakang tungku untuk pembakaran berlawanan dan di dinding depan tungku hanya untuk pembakaran depan. Panjang nyala api dikontrol agar relatif lebih pendek daripada pembakaran sudut melingkar dengan pencampuran cepat antara udara dan bahan bakar yang efektif untuk pembakaran sempurna; sebaliknya, pencampuran bertahap penting untuk mengontrol reduksi NO. Untuk mengatasi masalah antara pembakaran sempurna

dan reduksi NO, berbagai jenis alat pencampur udara dan bahan bakar seperti baling-baling deflektor dan generator berputar telah diterapkan.

2.3 Batu bara

Batu bara merupakan sumber daya alam yang tidak terbarukan karena butuh jutaan tahun untuk terbentuk batuan sedimen organik dan termasuk dalam kategori bahan bakar fosil. Batu bara adalah batuan sedimen organik yang mudah terbakar berwarna hitam atau hitam kecoklatan dengan kandungan karbon tinggi. Sifat fisik dan kimia tergantung pada tingkat evolusi yang dicapai sepanjang masa geologisnya. Batu bara sebagian besar terdiri dari materi organik yang berasal dari sisa-sisa tanaman.

Batu bara masih menjadi sumber energi utama untuk tenaga pembangkit listrik di dunia sampai saat ini. Sebagai bahan bakar fosil termurah, paling melimpah, dan didistribusikan secara luas di dunia, sehingga 41% pembangkit energi dunia masih menggunakan batu bara sebagai sumber energinya. Selain untuk pembangkit listrik batu bara juga digunakan dalam industri baja, produksi semen, bahan kimia seperti aluminium, batu bata, kapur, pupuk dan sebagainya (Suárez-Ruiz dkk., 2019). Gambar 2.2 di bawah ini menunjukkan skema pembentukan batu bara berdasarkan peringkatnya.



Gambar 2.2 Skema pembentukan batu bara berdasarkan peringkat (Suárez-Ruiz dkk., 2019).

Batu bara menempati peringkat kedua sebagai bahan bakar fosil yang paling banyak digunakan setelah minyak bumi. Sedangkan dalam dunia industri, batu bara menjadi bahan bakar favorit yang digunakan untuk pembangkit tenaga industri. Jenis batu bara yang banyak digunakan di industri adalah lignit, sub bituminous, dan bituminous. Kualitas batu bara ditentukan oleh suhu, tekanan, dan panjang waktu pembentukan. Batu bara dapat menjadi sarana untuk mempertahankan dan memperkuat pertumbuhan ekonomi industri, baik daerah maupun negara. Batu bara menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan impor energi di dalam negeri karena biaya pengolahan batu bara sebagai sumber daya energi yang relatif rendah.

Batu bara memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, terutama emisi CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. Maka dari itu peningkatan teknologi pemrosesan batu bara diperlukan untuk mengurangi dampak negatif yang dihasilkan. Efisiensi termal pembangkit listrik yang menggunakan batu bara dalam prosesnya perlu ditingkatkan dengan melakukan perbaikan desain pembangkit batu bara dan pengembangan teknologi pembakaran batu bara yang baru. Dengan demikian kenaikan efisiensi termal diharapkan dapat menurunkan emisi CO₂.

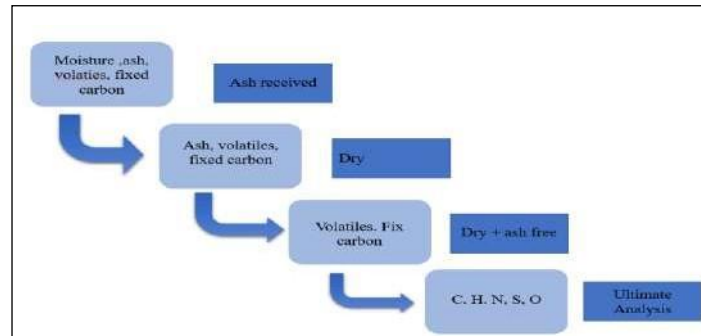
Adapun karakterisasi dalam menentukan kualitas atau peringkat batu bara adalah sebagai berikut (Oakey, 2016):

2.3.1 Analisis Basis Dasar

Batu bara memiliki variabilitas kadar abu dan kelembaban yang mempengaruhi hasil dari analisis proksimat untuk dilaporkan pada beberapa kondisi basis. Gambar 2.3 berikut menunjukkan analisis basis dasar kandungan batu bara yaitu:

1. *As recieved moisture* (ar);
2. *Moisture-free* atau *dry basis* (db) atau basis kering ;
3. *Dry, ash-free* (daf) atau basis kering bebas abu ; dan

4. *Mineral matte/ash-free* (maf) basis atau basis bahan mineral yang bebas abu.



Gambar 2.3 Analisis basis dasar batu bara (Oakey, 2016).

2.3.2 Analisis Proksimat

Analisis proksimat batu bara meliputi penentuan kadar air, abu, zat terbang dan karbon tetap melalui metode uji standar. Analisis proksimat adalah cara untuk menentukan distribusi produk ketika sampel dipanaskan di bawah kondisi tertentu. Penentuan kadar air, zat terbang, dan abu ditentukan oleh temperatur yang berbeda tingkat. Kelembaban dan bahan yang mudah menguap dapat diidentifikasi dengan kehilangan berat secara spesifik temperatur tinggi. Perbedaan parameter (kelembaban, volatil dan abu) adalah parameter karbon yang tetap. Analisis proksimat diperlukan dalam efisiensi pembakaran batu bara serbuk dari ketel uap yang sangat berpengaruh terhadap kandungan abu pada batu bara.

2.3.3 Analisis Ultimat

Analisis ultimat dilakukan untuk menentukan persen berat dari karbon (C), hidrogen (H), sulfur (S), nitrogen (N), dan oksigen (O). Analisis diukur menggunakan peralatan laboratorium khusus, elemen jejak seperti Cl dan F dapat dimasukkan dalam analisis ultimat.

2.3.4 Nilai Kalor

Nilai kalori batu bara dapat ditentukan dengan menggunakan kalorimeter bom adiabatik dan dinyatakan dalam KJ/Kg. Nilai kalor berperan dalam penentuan energi dari bahan bakar untuk memproduksi uap dan menunjukkan jumlah batu bara yang harus ditangani, dihancurkan, dan dibakar. Nilai kalor dibagi menjadi dua jenis yaitu *High Heating Value* (HHV) yaitu besarnya panas yang dilepaskan dari pembakaran sejumlah massa bahan bakar pada temperatur 25°C dengan produk hasil pembakaran yaitu, abu, gas O₂, SO₂, N₂, dan air dalam fase cair, dimana panas laten dari penguapan tidak dihitung. Sedangkan *Lower Heating Value* (LHV) yaitu panas yang dihasilkan oleh kuantitas satuan bahan bakar ketika total air dalam produk adalah bentuk uap.

2.3.5 Grindabilitas

Grindability atau grindabilitas mengacu pada kemudahan dalam menghancurkan sampel batu bara dibandingkan dengan referensi batu bara tertentu. *Hardgrove* (ASTM D409) merupakan metode standar yang digunakan dalam penggilingan batu bara. Penyiapan sampel dan ukuran sampel menerima sejumlah daya penggilingan pada penyemprotan berukuran kecil dan ukuran dari batu bara serbuk ditentukan dengan proses pengayakan. Semakin tinggi indeks grindabilitasnya, maka batu bara akan semakin mudah digiling.

2.3.6 Susunan Sulfur Batu bara

Untuk mengukur kuantitas sulfur yang ada pada batu bara seperti sulfat, sulfur, sulfur pirit, dan sulfur organik, digunakan pengujian standar ASTM D2492. Jumlah sulfur pirit yang terkandung di dalam batu bara akan menunjukkan sifat abrasif dari batu bara.

2.3.7 Free-swelling Index

Indeks pembengkakan bebas menunjukkan ukuran dari peningkatan volume batu bara ketika dipanaskan pada kondisi tertentu. Nilai tersebut digunakan sebagai indikasi karakteristik caking dari batu bara ketika dibakar sebagai bahan bakar.

2.3.8 Ash Fusion Temperatures

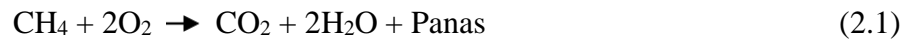
ASTM D1857 merupakan metode yang digunakan untuk menguji peleburan abu batu bara untuk mensimulasikan perilaku abu ketika dipanaskan di bawah atmosfer pereduksi atau pengoksidasi. Pengujian ini memberikan informasi tentang karakteristik fusi abu, yang memberikan indikator batu bara membentuk endapan (*slag*) saat dibakar.

2.3.9 Komposisi Abu

ASTM D3174 merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis sampel abu batu bara. Unsur-unsur dalam abu batu bara biasanya dilaporkan sebagai oksida seperti SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O dan K_2O . Hasil analisis komposisi abu dapat digunakan untuk melakukan perhitungan *fouling* dan *slagging*.

2.4 Pembakaran

Pembakaran adalah suatu runutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau api. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi, dan produknya adalah senyawa tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasi. Adapun reaksi kimia pada proses pembakaran terdapat di bawah ini (Ridhuan & Suranto, 2017).



Jenis pembakaran ada 2 yaitu:

1. Pembakaran sempurna

Pada pembakaran sempurna, reaktan terbakar dengan oksigen menghasilkan beberapa produk. Ketika hidrokarbon terbakar dengan oksigen, maka reaksi utama menghasilkan karbon dioksida dan air. Ketika elemen dibakar, maka produk yang dihasilkan biasanya juga berupa oksida. Karbon dibakar menghasilkan karbon dioksida, sulfur dibakar menghasilkan sulfur dioksida, dan besi dibakar menghasilkan besi (III) oksida. Nitrogen tidak dianggap sebagai komponen yang bisa terbakar jika oksigen dipakai sebagai agen pengoksidasi, namun nitrogen oksida Nox dalam jumlah kecil biasanya akan terbentuk. Jumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran sempurna disebut udara teoritis, Namun, pada prakteknya digunakan jumlah 2-3 kali jumlah udara teoritis.

2. Pembakaran tidak sempurna

Pembakaran tidak sempurna dihasilkan apabila tidak ada oksigen yang cukup untuk membakar bahan bakar sepenuhnya menjadi karbon dioksida dan air. Pada banyak bahan bakar, seperti minyak diesel, batu bara, dan kayu pirolisis muncul sebelum pembakaran. Pada pembakaran tidak sempurna, produk pirolisis tidak terbakar dan mengkontaminasi asap dengan partikulat berbahaya, misalnya oksidasi sebagian etanol menghasilkan asetaldehida yang berbahaya, begitu juga oksidasi sebagian karbon yang menghasilkan karbon monoksida yang beracun.

2.4.1 Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran dari bahan bakar, dapat terjadi jika syarat-syarat kimia berikut tercapai:

1. Terjadi kombinasi yang sempurna antara dua atau lebih reaktan berdasarkan rasio stokiometrik.
2. Massa elemen reaktan harus sama dengan massa hasil reaksi (hukum kekekalan massa).
3. Senyawa kimia terbentuk dari elemen-elemen kombinasi dengan hubungan massa yang tetap.
4. Formasi dari senyawa yang menghasilkan panas (reaksi eksotermik) ataupun yang membutuhkan panas (reaksi endotermik), berdasarkan atas perubahan energi bebas dari reaksi. Tabel berikut menjelaskan bentuk reaksi kimia pada berbagai jenis bahan bakar.

Tabel 2.2 Bentuk reaksi kimia bahan bakar (Ghifari, 2017)

Combustible	Molecular Weight	Reaction	Heat Release (Btu/lb)
Carbon	12	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	14,100
Hydrogen	2	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	61,000
Sulfur	32	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	4,000
Hydrogen sulfide	34	$H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	7,100
Methane	16	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	23,900
Ethane	30	$C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	22,300
Propane	44	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	21,500
Butane	58	$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	21,300
Pentane	72	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	22,000

Source: *Combustion*, edited by Joseph G. Singer, © 1991. Used by permission from Combustion Engineering, Inc.

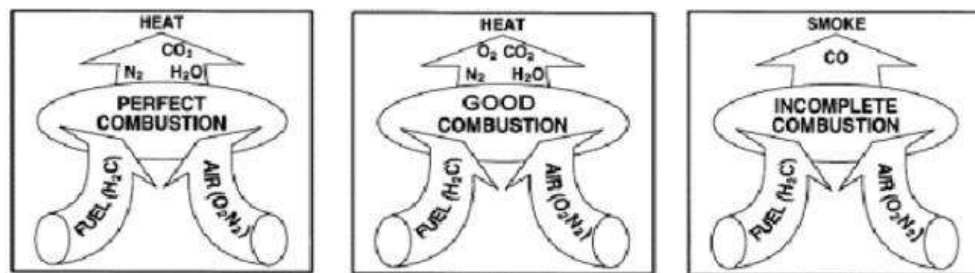
2.4.3 Pembakaran Tiga T

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “tiga T” yaitu (Samlawi, 2021):

1. Temperatur/suhu yang cukup tinggi untuk menyalakan dan menjaga penyalaan bahan bakar.
2. *Turbulance*/turbulensi atau pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik agar terjadi pencampuran sempurna.
3. *Time*/waktu yang cukup untuk pembakaran yang sempurna, Karena untuk pembetulan reaksi yang sempurna tidak sederhana dan menyangkut

banyak tahapan reaksi, waktu pembakaran juga mempengaruhi dimensi ruang bakar.

Pembakaran dengan bahan bakar berlebih maupun kekurangan, dapat memperbesar potensi adanya bahan bakar yang tidak terbakar maupun pembentukan CO. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan adanya komposisi O₂ yang tepat dengan adanya *excess air* untuk memastikan terjadinya pembakaran sempurna. Namun, terlalu banyak komposisi excess air, juga dapat meningkatkan kerugian atau maupun efisiensi dari pembakaran. Hal tersebut dikarenakan energi panas yang dilepaskan dari proses pembakaran semakin banyak terserap oleh komponen N₂ di dalam udara yang tidak dapat terbakar. Pada dasarnya udara tersusun dari komponen N₂ sekitar 78%, O₂ sekitar 21% dan 1% biasanya adalah argon dan gas-gas yang lain.



Gambar 2.4 Pembakaran yang sempurna, baik, dan tidak sempurna

(Ghifari, 2017).

2.4.4 Pembakaran Stoikiometri Kebutuhan Udara

Bahan bakar hidrokarbon akan dioksidasi secara menyeluruh menjadi karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O) jika tersedia pasokan oksigen dalam jumlah yang cukup. Kondisi pembakaran demikian disebut sebagai pembakaran stoikiometri dan persamaan reaksi kimia untuk pembakaran stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon (C_xH_y) dengan udara dituliskan persamaan sebagai berikut:



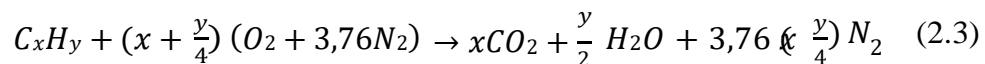
Kesetimbangan C: $x = b$

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

Kesetimbangan O: $2a = 2b + c \rightarrow a = b + c/2 \rightarrow a = x + y/4$

Kesetimbangan N: $2(3,76)a = 2d \rightarrow d = 3,76a \rightarrow d = 3,76a \rightarrow d = 3,76(x + y/4)$

Substitusi persamaan-persamaan kesetimbangan di atas ke dalam persamaan reaksi pembakaran C_xH_y menghasilkan persamaan sebagai berikut:



Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mendapatkan pembakaran stoikiometri:

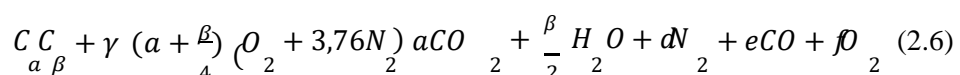
$$m_{O_2} = \frac{m_{atom O_2}}{m_{mol C_xH_y}} \times \text{persentase } C_xH_y \text{ (kg/kg bahan bakar)} \quad (2.4)$$

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

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum n_i M_i)_{air}}{(\sum n_i M_i)_{fuel}} = \frac{(x+4)M_{O_2} + 3,76(x+4)M_{N_2}}{xM_C + yM_H} \quad (2.5)$$

2.4.4 Pembakaran Non Stoikiometri

Mekanisme pembakaran dituntut dapat berlangsung secara cepat sehingga sistem-sistem pembakaran dirancang dengan kondisi udara berlebih. Hal ini dimaksudkan untuk mengantisipasi kekurangan udara akibat tidak sempurnanya proses pencampuran antara udara dan bahan bakar. Pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran non stoikiometri. Persamaan reaksi kimia untuk pembakaran non stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon (C_aH_β) dengan udara dituliskan sebagai berikut :



1. Pembakaran dengan komposisi campuran stokiometri
 Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum dengan kehilangan panas yang minimum. Hasil pembakaran berupa CO₂, uap air, dan N₂.
2. Pembakaran dengan komposisi campuran miskin
 Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum tetapi diikuti dengan bertambahnya kehilangan panas karena udara berlebih. Hasil pembakaran berupa CO₂, uap air, O₂ dan N₂.
3. Pembakaran dengan komposisi campuran kaya
 Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang kurang maksimum karena ada bahan bakar yang belum terbakar. Hasil pembakaran berupa HC, CO, CO₂, H₂O, dan N₂. Sedangkan fraksi karbon terbentuk dari reaksi sekunder antara CO dan H₂O.

2.5 Udara Pembakaran

Dalam proses pembakaran selalu diperlukan oksigen. Oksigen ini dapat diperoleh dari udara atmosfer. Beberapa definisi mengenai udara dapat dinyatakan sebagai berikut :

1. Udara kering adalah udara tanpa kandungan air (*dry air*)
2. Udara basah (*wet air*) adalah udara dengan kandungan air yang masih terikat
3. Udara standard (*standard air*) adalah udara dengan kandungan 0,013 kg air per kg udara kering (sesuai dengan RH = 60% pada 25°C).

Komposisi udara dan data lain sebagai berikut:

Tabel 2.3 Komposisi udara di atmosfer

Unsur	%Volume	%Berat
Oksigen (O ₂)	20,99	23,15
Nitrogen (N ₂)	78,03	76,85
Gas lain	0,98	

2.5.1 Campuran Udara-Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran udara dan bahan bakar memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran udara dan bahan bakar antara lain AFR (*Air-fuel Ratio*), FAR (*Fuel-air Ratio*), dan Rasio Ekivalen (Φ).

2.5.1.1 Rasio Udara- Bahan Bakar (AFR)

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai :

$$AFR = \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}} \quad (2.7)$$

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

2.5.1.2 Rasio Bahan Bakar-Udara (FAR)

Rasio bahan bakar - udara merupakan kebalikan dari AFR yang dirumuskan sebagai berikut :

$$AFR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N} \quad (2.8)$$

2.5.1.3 Rasio Ekivalen (Φ)

Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio ekivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara - bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara - bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar - udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar - udara (FAR) stoikiometrik.

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \quad (2.9)$$

$\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai kaya bahan bakar (*fuel - rich mixture*).

$\Phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel - lean mixture*).

$\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna).

2.5.1.4 Udara Berlebih (*Excess Air*)

Dalam proses pembakaran sulit untuk mendapatkan pencampuran yang memuaskan antara udara dan bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran aktual. Udara perlu diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna seluruh bahan bakar yang ada.

Udara berlebih (*excess air*) didefinisikan sebagai udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah yang lebih besar dari jumlah teoritis yang dibutuhkan bahan bakar. Udara berlebih dapat dideduksi dengan pengukuran komposisi produk pembakaran dalam keadaan kering (*dry basis*). Jika produk merupakan hasil pembakaran sempurna, maka persentase udara berlebih dapat dinyatakan sebagai :

$$\%XSA = \frac{(X_{O_2})_{prod}}{(X_{N_2})_{prod}/3,76 - (X_{N_2})_{prod}} \quad (2.10)$$

2.6 Emisi Proses 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 (CO_2) dan air (H_2O) dapat menimbulkan efek rumah kaca dan pembentukan kabut lokal. Adapun produk sekunder proses pembakaran adalah karbon monoksida (CO), hidrokarbon yang tidak terbakar (HC), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (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 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).

1. Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) merupakan salah satu parameter pencemaran udara yang perlu diperhatikan. Karbon monoksida terdiri dari satu atom karbon (C) dan satu atom oksigen (O). Gas buang karbon monoksida (CO) tidak berbau, tidak berasa, dan tidak berwarna, tetapi gas buang ini beracun akibat dari pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Gas CO dapat bereaksi dengan hemoglobin yang kemudian akan menurunkan kemampuan darah dalam membawa oksigen (Ayuningtyas, 2019).

2. Nitrogen Oksida (NO_x)

Dalam proses pembakaran dapat terbentuk nitrogen oksida yang berasal dari bahan bakar maupun berasal dari atmosfer. Pembentukan NO_x bergantung pada temperatur dan jumlah oksigen yang digunakan. Mekanisme pembentukan NO_x yang berasal dari nitrogen di dalam bahan bakar pada dasarnya dibentuk dari oksidasi nitrogen organik di dalam bahan bakar. NO_x yang berasal dari bahan bakar ini bisa menjadi penyumbang signifikan bagi NO_x pada saat pembakaran. Laju pembentukan nitrogen sendiri berbanding lurus dengan temperatur.

3. Sulfur Dioksida (SO₂)

Gas buang sulfur oksida memiliki pengaruh terhadap lingkungan, karena gas tersebut bersifat korosif dan beracun. Gas buang ini dapat menyebabkan iritasi membran lendir pada daerah pernapasan dan juga dapat menyebabkan penyakit pernapasan kronis khususnya bronkitis (Talayansa dkk., 2017).

2.7 Simulasi pada *Pulverized Burner*

Simulasi proses pembakaran dalam ruang bakar sebuah *pulverized burner* merupakan salah satu metode untuk mengetahui fenomena fisik yang terjadi di ruang bakar. Oleh karena itu dibutuhkan persamaan-persamaan fisik yang mengatur proses yang terjadi di dalam ruang bakar antara lain:

1. Persamaan kekekalan massa (kontinuitas)
2. Persamaan kekekalan momentum
3. Persamaan kekekalan energi

Persamaan-persamaan tersebut selanjutnya akan diselesaikan secara numerik dengan bantuan perangkat lunak.

2.7.1 Persamaan Kekekalan Massa

Persamaan kekekalan massa atau persamaan kontinuitas yang diterapkan adalah:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.11)$$

Dimana:

ρ = massa jenis

\vec{V} = vektor kecepatan

Persamaan 2.11 di atas merupakan persamaan umum dari hukum kekekalan massa yang berlaku untuk aliran kompresibel dan inkompresibel.

2.7.2 Persamaan Kekekalan Momentum (Navier-Stokes)

Dengan mengaplikasikan hukum Newton kedua, didapatkan persamaan kekekalan momentum sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.12)$$

Dimana:

ρ = massa jenis

\vec{V} = vektor kecepatan

p = tekanan statis

$\rho \vec{g}$ dan \vec{F} = pengaruh gaya gravitasi dan gaya eksternal.

$\bar{\tau}$ = tensor tegangan

2.7.3 Persamaan Kekekalan Energi

Persamaan umum kekekalan energi dapat dirumuskan sebagai:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla (\vec{V}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(\nabla T_{\text{eff}} - \sum_j h_j \vec{j}_j + \rho \vec{V} \cdot \vec{V}_{\text{eff}} \right) + S_h \quad (2.13)$$

dimana \vec{j}_j adalah fluks difusi spesies, h_j adalah entalpi spesies dan p adalah tekanan. Suku S_h adalah sumber energi yang berasal dari reaksi, radiasi, perpindahan panas.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Studi literatur: tahapan pertama dalam penelitian ini adalah studi literatur. Dimulai dengan mempelajari perancangan *burner*, analisis kebutuhan udara, dan memahami sistem pembakaran yang digunakan *burner*.
- Perancangan *burner*: selanjutnya merancang dimensi *burner* dengan menentukan panjang, diameter dalam dan luar, diameter *screw*, diameter tabung, jarak pitch, dan sistem pembakaran yang digunakan *burner*.
- Analisis kebutuhan udara *burner*: setelah mendapatkan dimensi *burner* selanjutnya menghitung analisa kebutuhan udara dalam *burner*. Analisa kebutuhan udara ini sebagai acuan dalam melakukan simulasi laju aliran udara.
- Melakukan simulasi: simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 2022 R2 *Students*, dengan menggunakan geometri hasil rancangan. Simulasi digunakan untuk mendapatkan distribusi temperatur selama pembakaran dan laju aliran angin di dalam *burner*.
- Analisa hasil simulasi: setelah mendapatkan hasil simulasi, selanjutnya melakukan analisa hasil simulasi.
- Kesimpulan: Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian dan dituangkan dalam bentuk laporan.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini penulis memilih waktu dan tempat penelitian sebagai berikut:

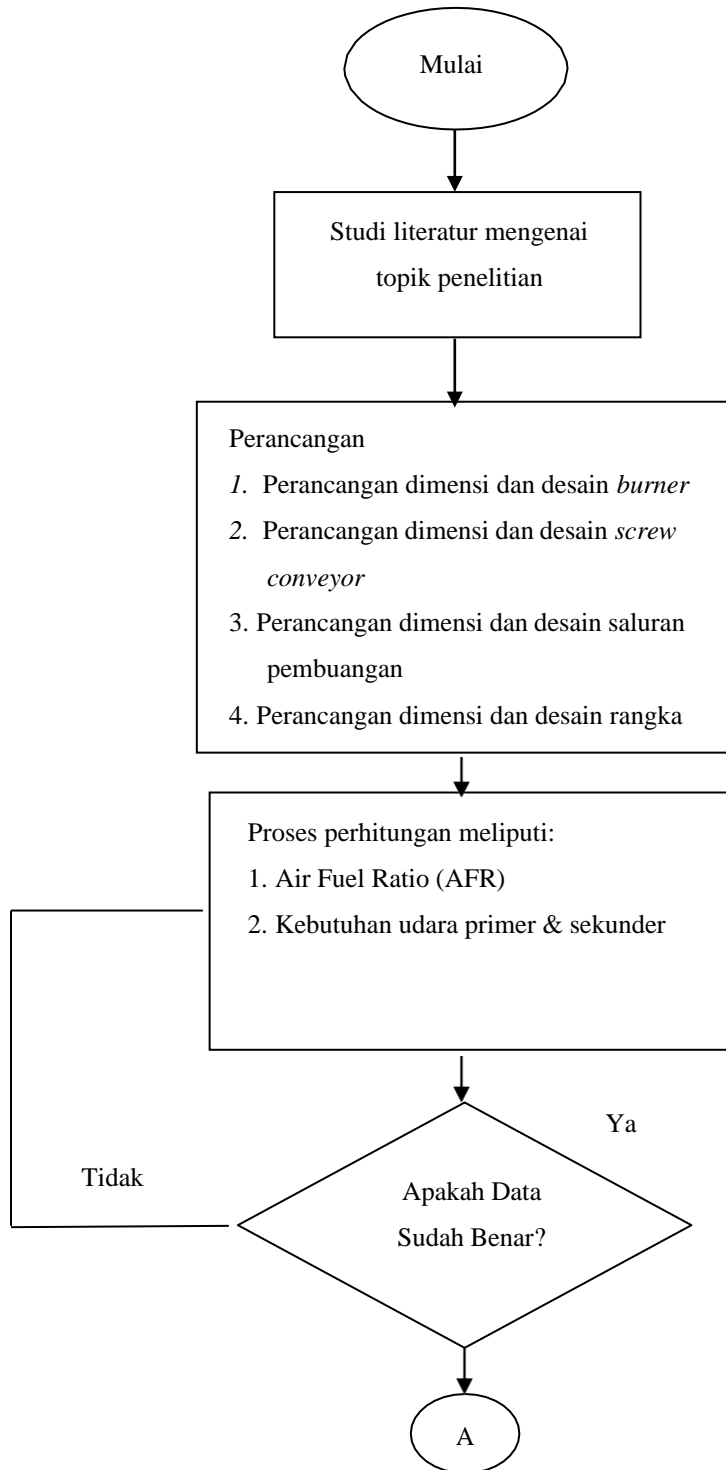
3.2.1 Tempat Penelitian

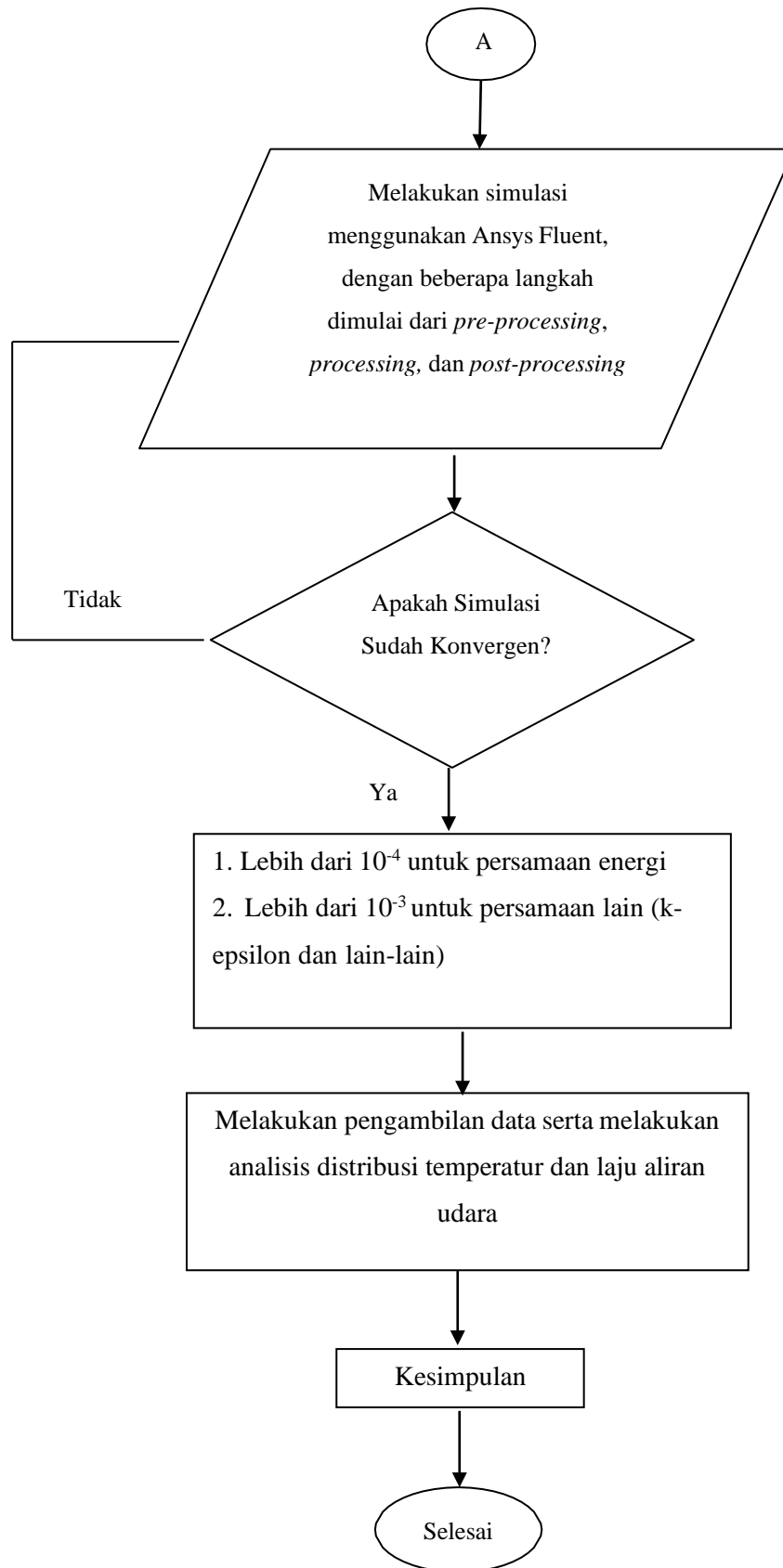
Penelitian dan pengambilan data akan dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.2.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilakukan pada bulan April 2023 sampai dengan Juni 2023.

3.3 Diagram Alir Metode Penelitian

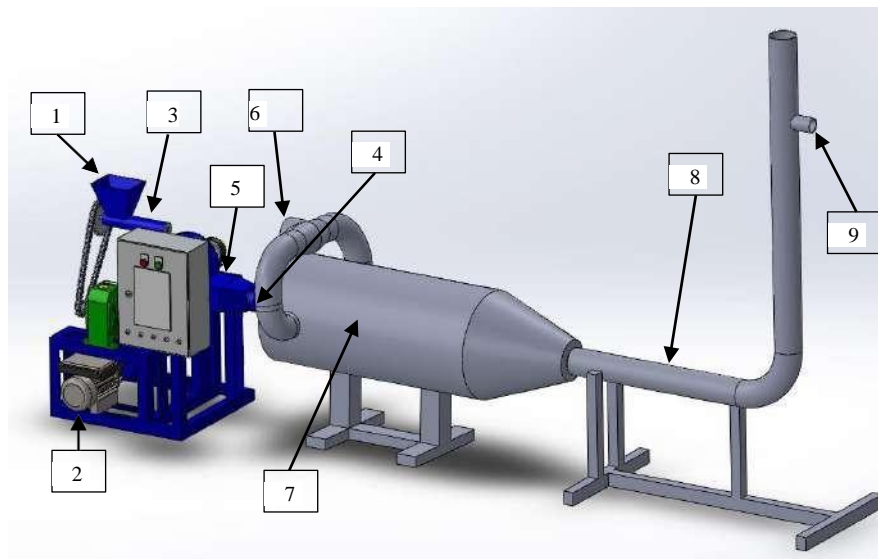




Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.4. Perancangan Desain *Pulverized Burner*

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan, dimulai dari prosedur perancangan desain *pulverized burner* dengan menggunakan perangkat lunak menggambar. Perancangan dilakukan untuk mengetahui laju aliran udara setelah ditambahkan *secondary air* di *burner*. *Pulverized burner* ini memiliki geometri bagian diameter dalam pipa 7,62 cm, diameter luar pipa 8,62 cm, panjang *burner* 80 cm, diameter pipa aliran udara sekunder 7,62 cm, tinggi kaki burner 60 cm, tinggi input *primary air* dengan *secondary air* 10cm, diameter dalam *burner* 20 cm, dan diameter output burner 7,62 cm. Adapun skema instalasi alat uji *co-firing* diilustrasikan Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema *pulverized burner*.

1. *Hopper*

Berfungsi sebagai tempat untuk masuknya bahan bakar padat.

2. Motor listrik

Berfungsi sebagai penggerak *screw conveyor*.

3. *Screw Feeder*

Berfungsi untuk mentransfer secara kontinyu bahan bakar padat.

4. Blower Primer

Berfungsi membawa bahan bakar menuju ruang bakar dan memberikan suplai oksigen di ruang bakar.

5. Selang

Berfungsi sebagai media untuk meneruskan aliran bahan bakar menuju ruang bakar.

6. Blower *secondary*

Berfungsi memberikan tambahan oksigen dan membuat aliran udara turbulensi di ruang bakar.

7. *Burner*

Burner merupakan tempat terjadinya pembakaran dan pencampuran antara bahan bakar dengan udara.

8. *Exhaust Manifold*

Berfungsi sebagai saluran pembuangan hasil pembakaran.

9. Lubang pengujian emisi

Digunakan untuk pengambilan sampel pengujian emisi.

3.5 Kebutuhan Udara Primer & Udara Sekunder

Kebutuhan udara pembakaran di dalam burner disuplai melalui 2 inlet udara yakni inlet primer dan sekunder. Pada inlet primer kecepatan udara diatur konstan untuk menyuplai sebesar $70 \text{ m}^3/\text{jam}$ dan kecepatan udara dari inlet sekunder dapat diatur untuk memenuhi kebutuhan udara sesuai dengan *excess air*. Adapun blower sekunder dapat dilihat Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Blower sekunder.

Spesifikasi blower pada inlet sekunder

Merek = Blower 3 inch NRT PRO-Electric Blower 3"

Dimensi = 27 cm x 27 cm x 29,5 cm

Diameter outlet = 68 mm

Voltase = 220-230 V

Frekuensi = 50 Hz

Tenaga masuk = 370 Watt

Average Speed = 3000-3600 rpm

Luas penampang *outlet blower*:

Tabel 3.1 kebutuhan udara pembakaran primer dan sekunder

Rasio Batu bara (25 kg/jam)	Persentase senyawa Atom				Kebutuhan O ₂			O ₂ dalam Bahan Bakar	Kebutuhan O ₂ kg udara/kg bahan bakar	AFR Stoikiometrik (kg udara/kg bb)
	C	H	S	O	C	H	S			
Batu bara 100%	60,7	6,17	0,52	27,3	1,62	0,4936	0,005	0,2733	2,885	12,436
Batu bara 100%	60,7	6,17	0,52	27,3	1,62	0,4936	0,005	0,2733	2,885	12,436
Batu bara 100%	60,7	6,17	0,52	27,3	1,62	0,4936	0,005	0,2733	2,885	12,436
Batu bara 100%	60,7	6,17	0,52	27,3	1,62	0,4936	0,005	0,2733	2,885	12,436

Bahan Bakar	Excess Air	AFR Aktual	Volume Flow Rate (m ³ /jam)		Vair (m/s)	
			Primer	Sekunder	Primer	Sekunder
Batu bara 100%	0%	12,436	95	164,091	7,27	5,41
Batu bara 100%	10%	13,679	95	190	7,27	6,67
Batu bara 100%	20%	14,923	95	215,909	7,27	7,94
Batu bara 100%	30%	16,167	95	241,818	7,27	9,21

3.6 Tahap Simulasi

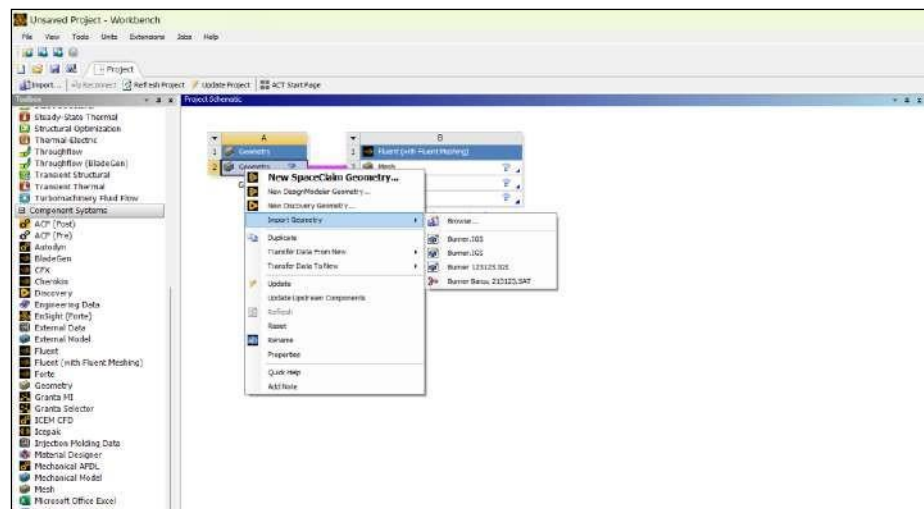
Simulasi menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 2022 R2 *Students*. Tahapan utama dalam simulasi yang akan dilakukan adalah *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

3.6.1 Pre-Processing

Pre-processing merupakan tahapan awal dari simulasi numerik. Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan yaitu pembuatan geometri, pembuatan *meshing*, dan penentuan domain pemodelan.

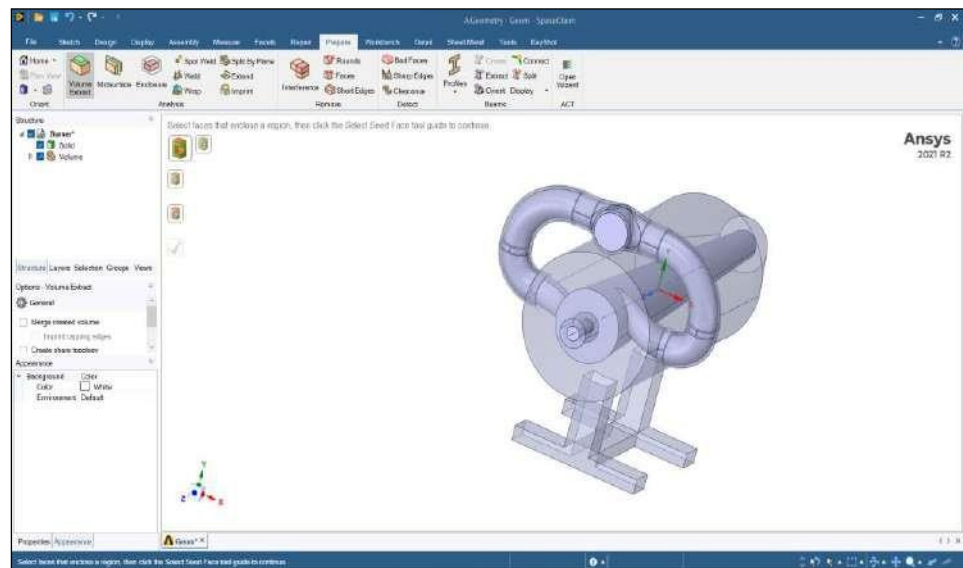
3.6.1.1 Pembuatan Geometri

Pada proses simulasi dengan menggunakan Ansys Fluent terdapat beberapa tahapan yang harus dilalui. Tahapan pertama adalah dengan melakukan desain geometri. Pada kasus ini desain geometri telah dilakukan pada aplikasi yang berbeda yaitu dengan menggunakan perangkat lunak menggambar. Gambar 3.4 menunjukkan proses impor geometri dari perangkat lunak menggambar.



Gambar 3.4 Proses impor geometri dari perangkat lunak menggambar.

Oleh karena desain geometri telah dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak menggambar, maka pada tahapan selanjutnya setelah melakukan impor geometri di Ansys Fluent dengan mengubah domain geometri menjadi domain fluida. Seperti yang ditunjukkan Gambar 3.5.

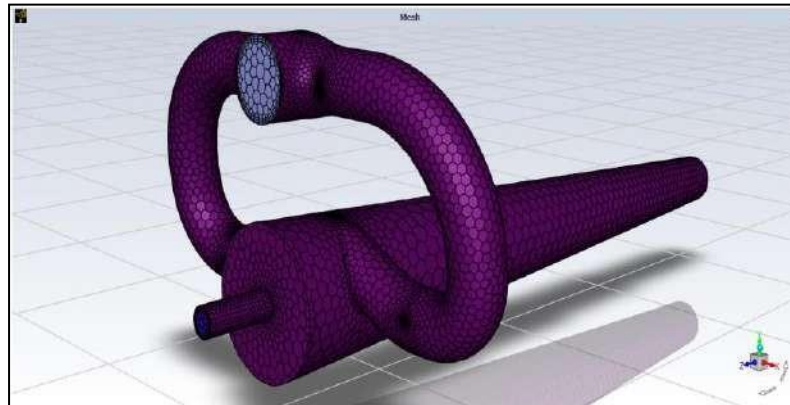


Gambar 3.5 Proses pembuatan domain fluida.

3.6.1.2 *Meshing* atau Diskritisasi

Meshing atau diskritisasi adalah proses pemecahan domain menjadi volume yang lebih kecil. Hal ini dilakukan untuk memudahkan diskritisasi domain aliran dan menerapkan persamaan pengendali pada domain aliran, sehingga persamaan-persamaan mekanika fluida yang pada umumnya dalam bentuk persamaan diferensial parsial non-linear dapat diselesaikan secara numerik. Untuk mendapatkan simulasi yang akurat maka pemilihan *meshing* pada sebuah geometri dibuat mengikuti prediksi perubahan pola aliran yang terjadi.

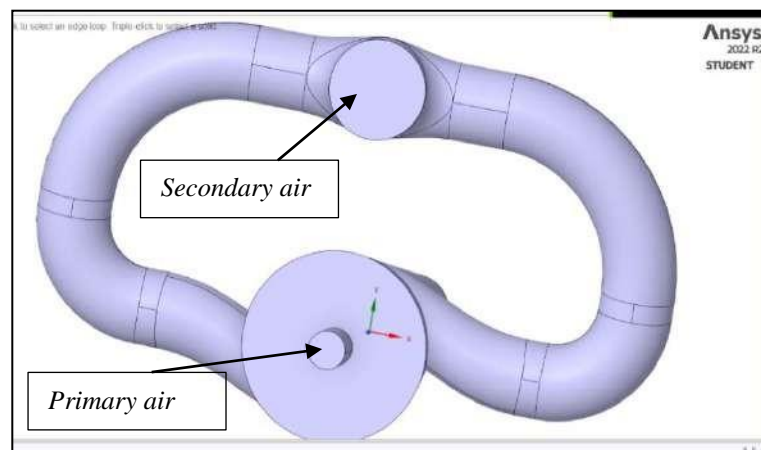
Secara umum, semakin kecil ukuran mesh akan menghasilkan hasil komputasi yang lebih detail dan akurat, namun akan menambah jumlah elemennya, sehingga akan membutuhkan proses komputasi yang lebih tinggi. Gambar 3.6 menunjukkan hasil *meshing* pada *burner*.



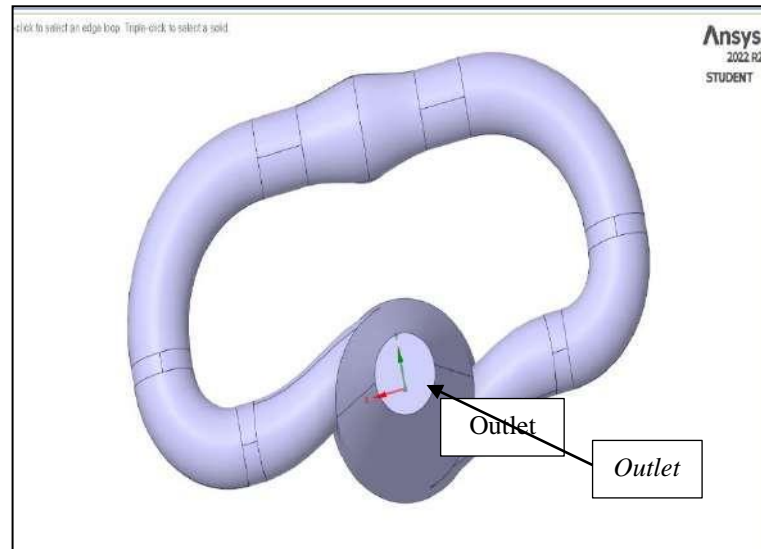
Gambar 3.6 Hasil *meshing* pulverized burner.

3.6.1.3 Penentuan Domain Pemodelan

Domain pemodelan yang digunakan antara lain *boundary condition* tipe *velocity inlet* untuk *primary air* yang berjumlah 1 buah, *secondary air* yang berjumlah 1 buah. Sedangkan untuk *outlet burner* menggunakan *boundary condition* tipe *pressure-outlet* seperti yang ditunjukkan Gambar 3.7 dan Gambar 3.8



Gambar 3.7 Penentuan domain inlet burner.



Gambar 3.8 Penentuan domain *outlet burner*.

3.6.2 Processing

Processing merupakan tahap kedua dalam simulasi CFD, yakni dengan melakukan pengaturan pada perangkat lunak Ansys Fluent 2022 R2 *Students*. Beberapa pengaturan yang akan dilakukan diantaranya adalah *models*, *materials*, *boundary condition*, *conditions*, *operating conditions*, *control and monitoring conditions*, serta *initialize conditions*. Setelah dilakukan pengaturan, dapat dimulai proses iterasi untuk menyelesaikan simulasi. Berikut di bawah ini merupakan penjelasan lebih detail mengenai langkah-langkah dalam *processing*:

3.6.2.1 Model

Secara umum model numerik yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.2

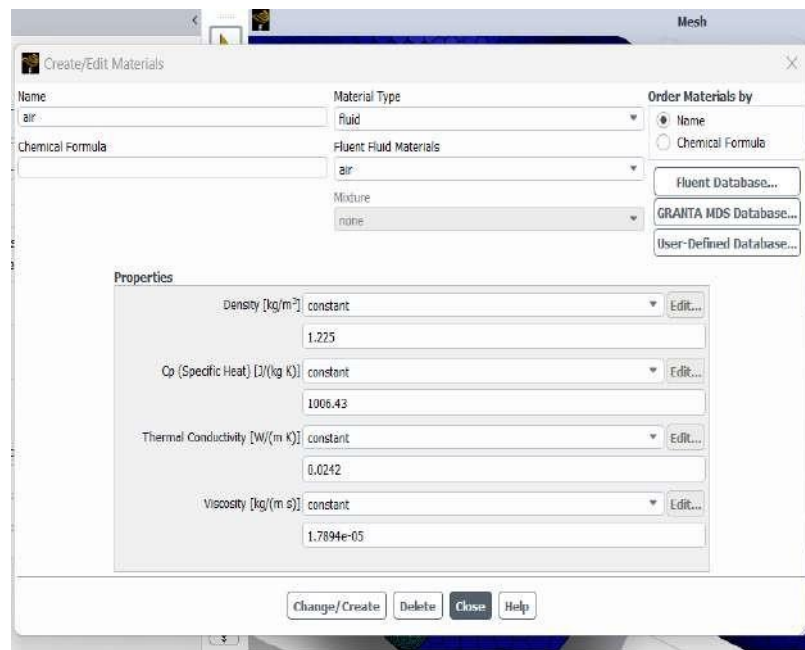
Tabel 3.2 Model yang digunakan dalam simulasi *pulverized burner*

Models	Keterangan	Dasar Pemikiran
Energy	On	Diperlukan hasil temperatur pembakaran
<i>Viscous</i>	<i>k-ε standard</i>	Dapat menyelesaikan masalah permasalahan <i>combustion, buoyancy</i> dan <i>heating</i>
Radiation	Off	Penelitian ini tidak mengarah pada perpindahan panas
<i>Heat Exchanger</i>	Off	<i>Heat Exchanger</i> diabaikan
<i>Species</i>	Off	Tidak diperlukan
<i>Discrete Phase</i>	Off	Tidak diperlukan
<i>Solidification</i>	Off	Tidak diperlukan
<i>Acoustics</i>	Off	Tidak diperlukan
<i>Eulerian Wall</i>	Off	Tidak diperlukan
<i>Film</i>	Off	Tidak diperlukan

Model viskos yang dipilih adalah k-ε standar karena model turbulensi ini cukup lengkap dengan kestabilan, ekonomis dari segi komputasi, dan akurasi yang cukup untuk berbagai macam jenis aliran turbulen sehingga menjadikan k-ε standar sebagai model turbulensi yang paling sering digunakan dalam mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, dan pembakaran. Kemudian terdapat beberapa modifikasi dari model k-ε, yaitu RNG k-ε dan realizable k-ε. RNG k-ε lebih cocok digunakan untuk aliran yang mengalami halangan tiba-tiba, aliran swirl, dan lebih cocok untuk kasus dengan bilangan Reynolds yang rendah. Sementara itu, k-ε yang dapat direalisasikan lebih cocok untuk laju aliran fluida dengan nozzle/jet seperti jet. Model ini juga baik untuk aliran yang fokus analisisnya adalah pada pola swirl, boundary layer yang memiliki gradien tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi. Model k-ε RNG dan k-ε realizable membutuhkan waktu komputasi 10-15% lebih lama dibandingkan dengan model k-ε standar karena adanya tambahan besaran dan fungsi yang harus diselesaikan, sehingga diantara ketiga model yang didasarkan pada persamaan k-ε tersebut, penulis menganggap model k-ε standar adalah model yang paling sesuai untuk kasus ini.

3.6.2.2 Material

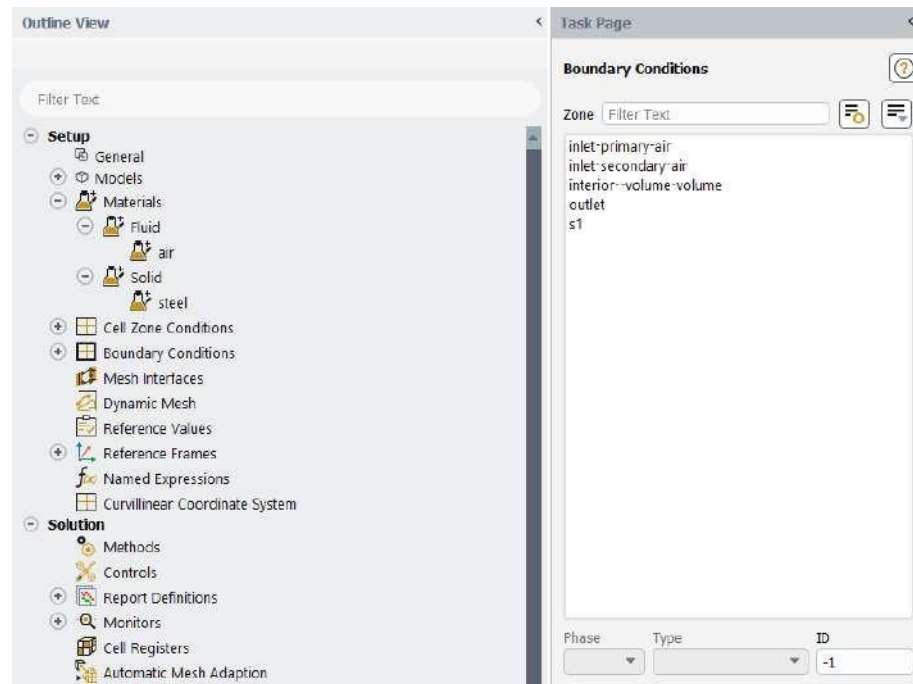
Propertis material digunakan untuk mengatur kondisi batas material yang digunakan. Dalam kasus ini kondisi batas yang digunakan untuk materialnya menggunakan data karakteristik dari udara. Seperti yang ditunjukkan Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Pemilihan material simulasi.

3.6.2.3 Boundary Conditions

Boundary conditions adalah batasan nilai dan kondisi yang harus diberikan pada domain aliran agar simulasi sesuai dengan fenomena fisik yang terjadi. Domain pemodelan yang digunakan pada pemodelan ini seperti dijelaskan pada sub bab 3.7.1.3. Input nilai yang digunakan untuk *boundary condition* pada simulasi *pulverized burner* ini dapat dilihat Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Boundary condition menu.*

3.6.2.4 Operating Conditions

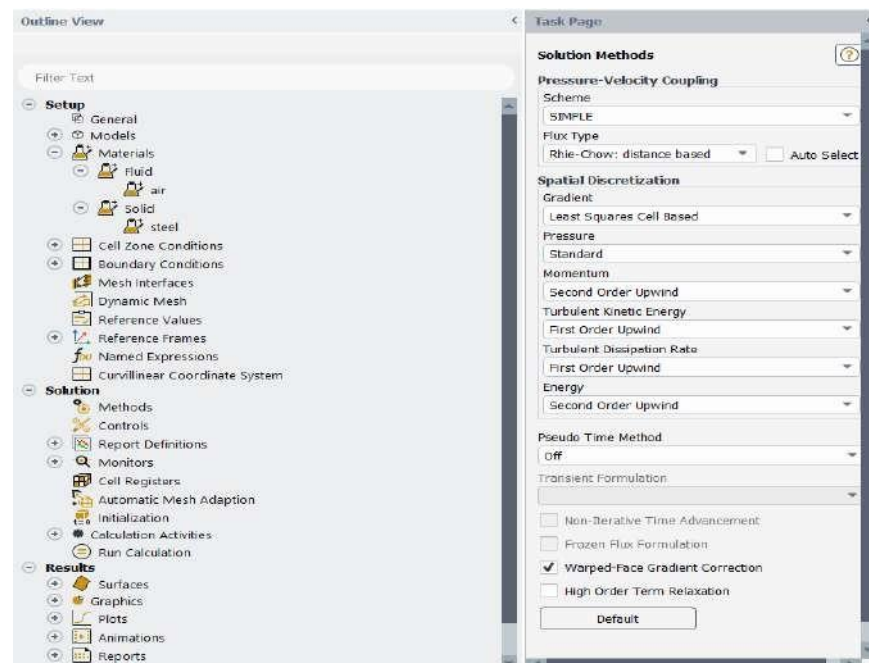
Operating condition merupakan perkiraan tekanan daerah operasi *burner*. Dalam simulasi ini, tekanan operasional divariasikan sesuai dengan *excess air* serta terdapat pengaruh gaya gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$. Adapun tekanan operasional dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Tekanan Operasi Simulasi

<i>ExcessAir</i>	V udara (m/s)		Tekanan Operasi (kPa)
	Primer	Sekunder	
0%	7,27	5,41	40
10%	7,27	6,67	60
20%	7,27	7,94	80
30%	7,27	9,21	100

3.6.2.5 Solution

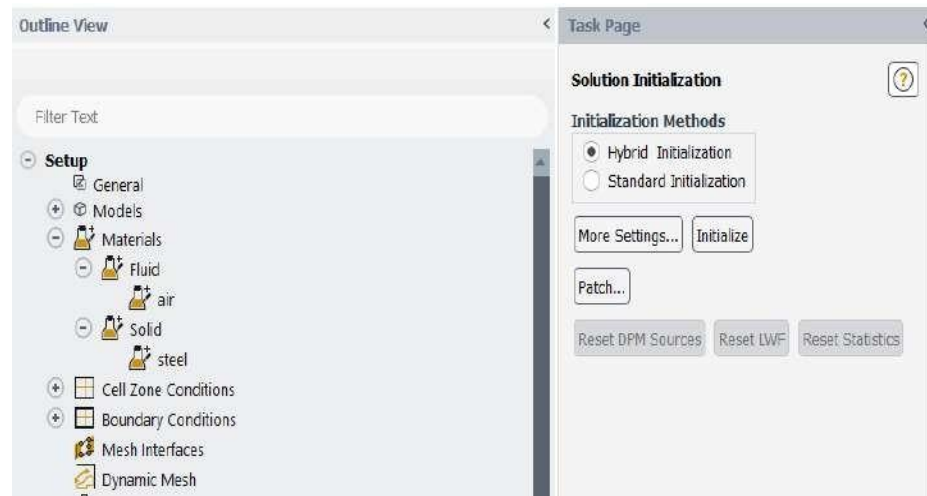
Solusi pada studi numerik dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 2022 R2 *Students* yaitu: *pressure-velocity coupling* menggunakan metode SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*), *gradient* menggunakan *Least Square Cell Based*, untuk *Pressure* menggunakan *standard*, *momentum* menggunakan *Second Order Upwind*, *Turbulent Kinetic Energy* menggunakan *First Order Upwind* seperti yang ditunjukkan Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Metode solusi simulasi.

3.6.2.6 Initialize Conditions

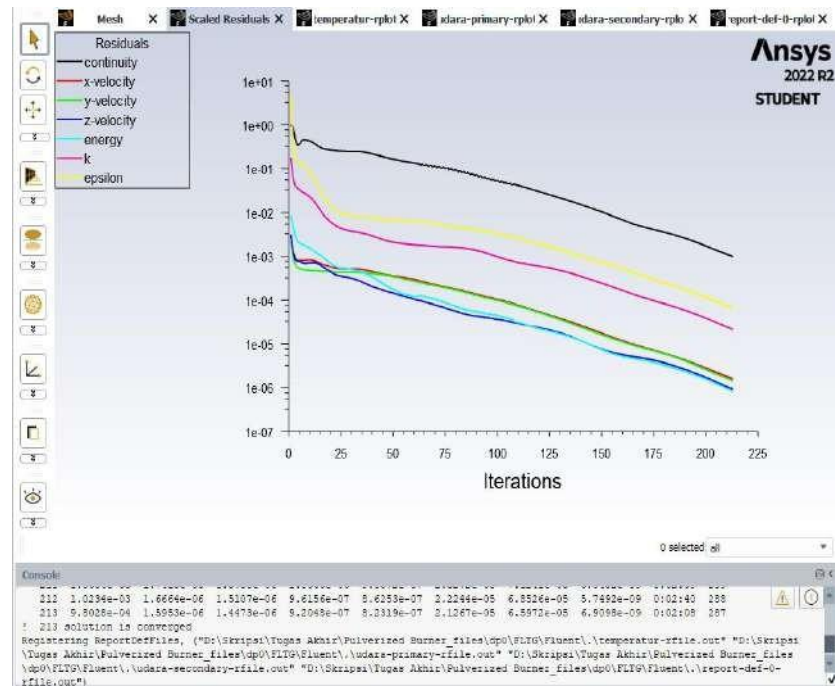
Initialize conditions merupakan nilai awal untuk tiap parameter sebelum proses iterasi untuk memudahkan simulasi mencapai konvergen. *Initialize* yang digunakan dalam simulasi ini adalah *hybrid initialize*, untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions* dari *inlet* seperti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



Gambar 3.12 *Initialization menu.*

3.6.2.7 *Monitoring Residual*

Monitoring residual adalah tahap penyelesaian masalah berupa proses iterasi hingga mencapai harga konvergen yang diinginkan. Harga konvergen ditetapkan sebesar 10^{-3} artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah 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 Tahapan iterasi.

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 (kontur dan grafik), dan distribusi kecepatan (kontur dan vektor). Pengamatan akan dilakukan terhadap masing-masing variasi.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian simulasi pengaruh penambahan *secondary air* terhadap distribusi temperatur dan laju aliran udara adalah sebagai berikut:

1. Penambahan *secondary air* berpengaruh terhadap distribusi temperatur dalam *burner*. Hasil distribusi temperatur merata dari *inlet* sampai *outlet burner* dengan nilai tertinggi berturut-turut 829,3°C tanpa *excess air*, 824,3°C pada *excess air* 10%, 819°C pada *excess air* 20%, dan 814,2 °C pada *excess air* 30%.
2. Pengaruh penambahan *secondary air* terhadap laju aliran udara di dalam *burner* yaitu meningkatkan turbulensi aliran lebih tinggi saat pembakaran. Distribusi kecepatan udara lebih tinggi pada saluran *outlet* dibandingkan daerah lainnya dengan nilai berturut-turut 12,31 m/s tanpa *excess air*, 14,77 m/s pada *excess air* 10%, 17,27 m/s pada *excess air* 20%, dan 19,81 m/s pada *excess air* 30%.

5.2 Saran

Berikut merupakan beberapa saran yang dapat digunakan yaitu diantaranya:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mensimulasikan konsentrasi emisi.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada tambahan variasi *mesh* untuk mengetahui keakuratan hasil simulasi.
3. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut untuk mensimulasikan *co-firing* dengan biomassa.
4. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi geometri *burner* sehingga hasil simulasi yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayuningtyas, C. (2019). *Study Cross Sectional: Kadar HbCO Pada Darah Mekanik Bengkel Sepeda Motor Di Surayaba.11(4)*. <https://doi.org/10.20473/jkl.v11i4.2019.300-308>.
- Basu, P. (2015). Circulating fluidized bed boilers: Design, operation and maintenance. In P. Basu (Ed.), *Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06173-3>.
- Dewan Energi Nasional. (2022). *Outlook Energi Indonesia 2021*. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. www.den.go.id.
- Fernandez-Pello, A. C. (2011). Mechanical Engineering Series, Fundamentals of Combustion Processes. In F. F. Ling (Ed.), *Control* (1st ed.). Springer.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2020). Inventarisasi emisi GRK bidang energi. In *Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi Tahun 2020*.
- Mitchell, J. W. (2020). Introduction to Fluid Mechanics. In *Introduction to Fluid Mechanics* (10th ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1201/b18979>.
- Mustofa, A. (2023). *Co-Firing Batubara Sub-Bituminous B Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Tertorefaksi: Analisis Termogravimetri, Efisiensi Pembakaran, Emisi Dan Indeks Slagging*. Tesis. Universitas Lampung.

- Ozawa, M., & Asano, H. (2021). Power Boiler Design. In Y. Koizumi (Ed.), *Advances in Power Boilers* (1st ed., pp. 152–154). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820360-6.00011-4>.
- PLN. (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030. *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030, 2019–2028*.
- Prasetyo, A. B., Fauzun, Azmi, A. A., Pamuji, D. S., & Yaqin, R. (2018). Pengaruh Perbedaan Mesh Terstruktur dan Mesh Tidak Terstruktur Pada Simulasi Sistem Pendinginan Mold Injeksi Produk Plastik. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XIV Tahun 2019 (ReTII), 2018(November)*, 400–406.
- RI, P. P. (2017). *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Umum Energi Nasional*. [https://jdih.esdm.go.id/peraturan/Perpres 22 Tahun 2017.pdf](https://jdih.esdm.go.id/peraturan/Perpres%20Tahun%202017.pdf).
- Ridhuan, K., & Suranto, J. (2017). Perbandingan Pembakaran Pirolisis Dan Karbonisasi Pada Biomassa Kulit Durian Terhadap Nilai Kalori. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 5(1), 50–56. <https://doi.org/10.24127/trb.v5i1.119>.
- Ronaldo Eng*, Abrar Riza, H. T. (2021). *Pengaruh Rasio Air-Fuel Ratio Terhadap Distribusi Temperatur Pulverized Pulverized-Coal Boiler*. 2(2), 44–50.
- Samlawi. (2021). Teknik Pembakaran. In Samlawi (Ed.), *Literasi Nusantara* (1st ed.). Literasi Nusantara.

- Sarkar, D. K. (2015). Pulverized Coal-Fired Boilers. In Elsevier (Ed.), *Thermal Power Plant Design and Operation* (1st ed., pp. 139–140). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801575-9.00004-4>.
- Setiawan, H. (2019). Simulasi CFD Untuk Tekanan Fluktuasi Tekanan Pada Kondensasi Steam Pada Pipa Konsentrik Horizontal Dengan Pendinginan Searah Didalam Ruang Anulus. *Jurnal Publikasi Skripsi, Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*, 1–11.
- Su, I., Diez, M. A., Rubiera, F., & Nacional, I. (2019). *Chapter 1. Coal* (M. A. D. and F. R. Isabel Suárez-Ruiz, Ed.; 1st ed., pp. 1–30). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102201-6.00001-7>.
- Talayansa, L., Widodo, S., & Anshariah. (2017). Analisis Emisi SO₂ Hasil Pembakaran Batubara. *Jurnal Geomine*, 5(2), 1–4.
- Utomo, M. S. K. T. S., Yohana, E., & Halim, R. (2022). Analisis Hidrodinamika Di Dalam Circulating Fluidized Bed Boiler. *Teknik Mesin S-1*, 10(3), 301–314.
- Zhao, H., & Wang, J. (2021). The Combustion Numerical Simulation of a Liquid Slag Pulverized Coal Burner in the High Temperature Secondary Air. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 898(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/898/1/012005>.
- Zhu, B., Shang, B., Guo, X., Wu, C., Chen, X., & Zhao, L. (2023). Study on Combustion Characteristics and NO_x Formation in 600 MW Coal-Fired Boiler Based on Numerical Simulation. *Energies*, 16(1), 1–31. <https://doi.org/10.3390/en16010262>