



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK CO-FIRING BATUBARA DAN
BIOMASSA DENGAN VARIASI PERSENTASE
BIOMASSA TERHADAP PERFORMA
PEMBANGKIT 400 MW**

TOMY ALBERTO MANURUNG
NRP 0211154000136

Dosen Pembimbing :
Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TUGAS AKHIR – TM184835

**STUDI NUMERIK CO-FIRING BATUBARA DAN
BIOMASSA DENGAN VARIASI PERSENTASE BIOMASSA
TERHADAP PERFORMA PEMBANGKIT 400 MW**

Tomy Alberto Manurung
NRP. 02111540000136

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA
SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



FINAL PROJECT – TM184835

**NUMERICAL SIMULATION OF CO-FIRING COAL AND
BIOMASS WITH VARIATION OF BIOMASS
PERCENTAGE AGAINST PERFORMANCE OF
GENERATOR 400 MW**

Tomy Alberto Manurung
NRP. 02111540000136

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

BACHELOR'S DEGREE
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM
ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020

**STUDI NUMERIK *CO-FIRING* BATUBARA DAN
BIOMASSA DENGAN VARIASI PERSENTASE
BIOMASSA TERHADAP PERFORMA
PEMBANGKIT 400 MW**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Tomy Alberto Manurung

NRP. 02111540000136

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 196505051990031005
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT. (Penguji 1)
NIP. 197104051997021001
3. Is Bunyamin Suryo, ST, MSc. (Penguji 2)
NIP. 198006272012121003
4. Ary Bachtiar K.P., ST, MT, PhD. (Penguji 3)
NIP. 197105241997021001

**SURABAYA
JANUARI, 2020**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI UKURAN
SIMULASI NUMERIK CO-FIRING BATU BARA DAN
BIOMASSA DENGAN VARIASI PERSENTASE
BIOMASSA TERHADAP PERFORMA PEMBANGKIT
400 MW**

Nama : Tomy Alberto Manurung
NRP : 0211154000136
Departemen : S – 1 Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

ABSTRAK

Pertumbuhan penduduk di Indonesia semakin cepat disertai dengan peningkatan kebutuhan, salah satunya adalah kebutuhan listrik. Salah satu perusahaan yang menghasilkan listrik adalah PLTU, beberapa PLTU menggunakan bahan bakar batubara sebagai bahan bakar utamanya. Pada saat ini batu bara menjadi sumber penghasil listrik terbanyak di Indonesia. Namun pembakaran batubara itu sendiri menghasilkan gas buang yang cukup berbahaya, seperti CO₂, SO₂, NO₂, dan CO. Salah satu teknologi yang dapat mengurangi efek gas buang tersebut adalah *co-firing*. Pembakaran bersama (*Co-firing*) adalah suatu teknologi untuk mengurangi emisi gas buang ke atmosfer. Pembakaran antara batubara dengan biomassa merupakan salah satu teknologi pembakaran bersama (*Co-firing*) pada pembangkit listrik baik yang telah ataupun yang akan beroperasi.

Dalam rangka mendukung program Pemerintah terkait isu lingkungan yaitu pengurangan emisi CO₂, SO₂, NO₂, dan CO dengan menggunakan teknologi pembakaran bersama (*Co-firing*), maka dalam penelitian ini akan dilakukan pembahasan mengenai *Co-firing* batubara dan biomassa dengan variasi persentase biomassa menggunakan *Software Ansys Fluent 16.2* untuk melihat proses pembakaran yang terjadi di dalam *boiler* dengan mengamati kontur kecepatan, kontur temperatur dan konsentrasi gas buang. Pada kondisi operasi, pembakaran antara biomassa yang dilakukan

yaitu variasi biomassa yang akan dicampurkan sebanyak 5% dari total batubara yang masuk. Penelitian dilakukan dengan pemodelan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) komersial yang mensimulasikan pembakaran dengan variasi prosentase bahan bakar yang di injeksikan pada *boiler*, yaitu menjadi 100% batubara, 95% batubara dan 5% biomassa.

Simulasi menggunakan *software Gambit* dan *ANSYS Fluent* untuk permodelan *boiler*. Hasil yang diperoleh dari penelitian, disimpulkan bahwa variasi 95% batubara dengan 5% biomassa adalah yang direkomendasikan diantara 100% batubara dan 95% batubara. Dengan variasi 95% batubara dengan 5% biomassa, diperoleh komposisi gas buang CO₂ 12.7%, gas CO 0.18% , gas O₂ 1.24% dan C 0.003%. Sedangkan untuk temperatur *nose* mencapai suhu 1857.71 K dan *outlet boiler* 407.91 K.

Kata Kunci : *Co-Firing, Ansys Fluent, Biomassa, Batubara. Computational Fluid Dynamics*

NUMERICAL SIMULATION OF CO-FIRING COAL AND BIOMASS WITH VARIATION OF BIOMASS PERCENTAGE AGAINST PERFORMANCE OF GENERATOR 400 MW

Student Name : Tomy Alberto Manurung

NRP : 02111540000136

Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS

Advisor : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

ABSTRACT

Population growth in Indonesia is faster accompanied by an increase in demand, one of which is electricity needs. One of the companies that produce electricity is PLTU, some PLTUs use coal as its main fuel. At this time coal is the biggest source of electricity producer in Indonesia. However, the combustion of coal itself produces quite dangerous exhaust gases, such as CO₂, SO₂, NO₂, and CO. One technology that can reduce the effects of the flue gas is co-firing. Co-firing is a technology to reduce exhaust emissions into the atmosphere. Combustion between coal and biomass is one of the co-firing technologies in power plants that have been or will be operating. In order to support Government programs related to environmental issues, namely the reduction of CO₂, SO₂, NO₂, and CO emissions by using co-firing technology, this research will discuss the Co-firing of coal and biomass with variations in the percentage of biomass using Software Ansys Fluent 16.2 to see the combustion process that occurs in the boiler by observing the speed contour, temperature contour and exhaust gas concentration.

In operating conditions, combustion between biomass is carried out, namely the variation of biomass that will be mixed as much as 5% of the total incoming coal. The research was conducted by modeling using commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) software that simulates combustion by varying the percentage of fuel injected into the boiler, which is 100% coal, 95% coal and 95% coal with 5% biomass.

The simulation uses Gambit and ANSYS Fluent software for boiler modeling. The results obtained from the study, concluded that the variation of 95% coal with 5% biomass is recommended between 100% coal and 95% coal. With a variation of 95% coal with 5% biomass, 12.7% CO₂ flue gas composition was obtained, 0.18% CO gas, O₂ gas 1.24% and C 0.003%. Whereas the nose temperature reaches 1857.71 K and boiler outlet is 407.91 K.

Keywords: *Co-Firing, Ansys Fluent, Biomass, Coal. Computational Fluid Dynamics*

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya dengan tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 pada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak yang terlibat. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Jokken Manurung dan ibu Restauli Sinaga, selaku kedua orang tua penulis serta Masryani S. Manurung dan Nova V. Manurung selaku kakak dari penulis yang selalu memberikan semangat sehingga tugas akhir ini dapat selesai dengan baik dan penuh kejujuran. Dan keluarga besar yang selalu memberikan doa, semangat, dan hal lain yang tidak bisa diungkapkan dengan kata-kata sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pelajaran, arahan, dan nasehat baik dalam kehidupan social maupun akademik.
3. Bapak Dr. wawan Aries Widodo, ST, MT; Bapak Is Bunyamin Suryo, ST, MSc.; dan Bapak Ary Bachtiar K.P.,ST, MT, PhD., selaku dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis terkait Tugas Akhir ini.
4. Bapak Ir. Sampurno, MT, selaku dosen wali yang telah memberikan arahan selama masa kuliah
5. Bapak Dian selaku karyawan Teknik Mesin yang telah memperbolehkan penulis untuk simulasi di Laboratorium CAE
6. Junaida Zamzami S.T. yang telah menemani dan memberikan support dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
7. Teman SC kaderisasi 2018, Ijaz, Hilda, Rasyidah, Juan yang

telah menemani penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini

8. Grup Tikungan Simanu, Agas, Alwan, Aldo, Danang, Hamjar, Ijaz, Jove, Juan, Juli, Markus, Prabas, Zhul, dan Geraldus yang telah menemani hari-hari penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini dan memberikan hiburan setiap saat
9. Seluruh Teman nyangkruk yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah mengisi cerita bagi penulis selama perkuliahan maupun dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
10. Chiko dan gengs warkop Kang Dhie yang selalu jadi tempat penulis untuk mencari ketenangan dan sebagai tempat bercerita dalam kehidupan perkuliahan penulis
11. BPH HMM 2017/2018 yang selalu mensupport penulis dalam kegiatan perkuliahan
12. Panitia kaderisasi 2017 yang telah menjalani banyak hal bersama penulis dan mendewasakan penulis menjadi pribadi yang lebih baik
13. Keluarga Angkatan M58 Teknik Mesin ITS yang memberikan penulis pengalaman dan cerita dalam perkuliahan

Semoga segala kebaikan dan keikhlasan yang diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna sehingga penulis terbuka terhadap saran dan kritik yang membangun demi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang.....	1
1. 2 Rumusan Masalah.....	4
1. 3 Tujuan Penelitian.....	4
1. 4 Batasan Masalah.....	4
1. 5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Bahan Bakar dan Proses Pembakaran.....	7
2.1. 1 Bahan Bakar	7
2.1.1. 1 Batubara.....	7
2.1.1. 2 Biomassa.....	8
2.1.1. 3 Ultimate dan Proximate Analisis Bahan Bakar	10
2.1. 2 Proses Pembakaran	11
2.1.2. 1 Pembakaran	11
2.1.2. 2 Co-firing	12
2.1. 3 Mekanisme Pembakaran Batubara	13
2. 2 Sistem Pembakaran pada Boiler	15

2.2. 1 Tangentially-fired Pulverizer Coal Combustion.....	15
2.2. 2 Over Fire Air (OFA).....	16
2. 3 Efisiensi Boiler	18
2.3. 1 Metode Langsung (Direct Method).....	18
2.3. 2 Metode Tak Langsung (Indirect Method)	20
2. 4 Perhitungan Panas yang Diserap Heat Exchanger.....	25
2. 5 Simulasi Pembakaran Batubara didalam Ruang Bakar Generator Uap	26
2.5. 1 Persamaan Kekakalan Massa (kontinuitas)	27
2.5. 2 Persamaan kekekalan momentum	27
2.5. 3 Persamaan kekakalan energi Persamaan umum kekakalan energi dirumuskan sebagai berikut:.....	28
2. 6 Software Ansys Fluent	28
2. 7 Penelitian terdahulu.....	29
2.7. 1 Penelitian Alexander Stroh.....	29
2.7. 2 Penelitian S.R. Gubba	35
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	43
3.1 Metodologi Penelitian	43
3. 2 Pemodelan dan Simulasi dengan Software Ansys Fluent ..	44
3.2. 1 Pre-processing	44
3.2. 2 Processing.....	47
3.2. 3 Post-processing.....	56
3. 3 Boundary Condition Penelitian	56
3.3. 1 Beban Economizer	57
3.3. 2 Beban Tube Wall.....	58

3.3. 3 Beban Superheater	59
3.3. 4 Beban Reheater.....	60
3. 4 Flowchart Penelitian	61
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	63
4. 1 Data Perhitungan	63
4.1 1 Perhitungan Panas yang Diserap Heat Exchanger.....	63
4. 2 Validasi.....	66
4. 3 Analisa hasil simulasi numerik.....	69
4.3. 1 <i>Distribusi temperatur</i>	70
4.3.1. 1 Distribusi temperatur pada z=center	70
4.3.1. 2 Distribusi temperatur pada tiap elevasi.....	73
4.3. 2 Distribusi Kecepatan.....	76
4.3.2. 1 Distribusi Kecepatan pada posisi z=center	77
4.3.2. 2 Distribusi Kecepatan pada tiap elevasi	78
4.3. 3 Distribusi Pathline	80
4.3.3. 1 Distribusi Pathline pada tiap elevasi.....	81
4.3. 4 Data Kuantitatif Boiler	83
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	86
5.1 Kesimpulan.....	87
5.2 Saran.....	87
DAFTAR PUSTAKA.....	89
LAMPIRAN	91
BIODATA PENULIS.....	97

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Proyeksi Konsumsi Listrik Perkapita Indonesia (2018-2027).....	2
Gambar 1. 2 Sebaran Potensi Energi Biomassa di Indonesia	3
Gambar 2. 1 Kategori biomassa (berdasarkan penggunaan dan aplikasi)	8
Gambar 2. 2 Proses co-firing batubara dengan biomassa.....	13
Gambar 2. 3 Proses pembakaran batubara.....	14
Gambar 2. 4 Pembakaran tangensial pada pulverizer boiler	16
Gambar 2. 5 Bagian-bagian dari furnace boiler.....	17
Gambar 2. 6 Diagram Metode Langsung (<i>Direct Method</i>)	19
Gambar 2. 7 Diagram Metode Tak Langsung (<i>Indirect Method</i>).....	21
Gambar 2. 8 Heat exchanger	26
Gambar 2. 9 Ilustrasi simulasi transfer massa, momentum, dan energi fasa diskrit dengan fasa kontinu	27
Gambar 2. 10 Skema proses fasilitas tes 1 MW _{th}	30
Gambar 2. 11 <i>Distribusi temperatur semua campuran bahan bakar</i>	31
Gambar 2. 12 Pirolisis batubara mentah untuk semua campuran bahan bakar.....	32
Gambar 2. 13 Reaksi pirolisis komponen biomassa.....	33
Gambar 2. 14 Distribusi gas buang untuk semua campuran bahan bakar	34
Gambar 2. 15 (a) diagram skematis dari domain tungku. (b) profil suhu dinding yang digunakan dalam simulasi CFD sebagai fungsi dari ketinggian tungku	36
Gambar 2. 16 (a) Kontur temperatur. (b) Kontur kecepatan	38
Gambar 3. 1 Boiler tampak samping	45
Gambar 3. 2 Meshing boiler	46
Gambar 3. 3 Domain pemodelan.....	47

Gambar 3. 4 Boundary Condition Penelitian	56
Gambar 3. 5 T-s diagram pada Economizer	57
Gambar 3. 6 T-s diagram pada Tube wall	58
Gambar 3. 7 T-s diagram pada Superheater	59
Gambar 3. 8 T-s diagram pada Reheater	60
<i>Gambar 3. 9 Flowchart Penelitian</i>	62
Gambar 4. 1 ilustrasi steam pada reheater	64
Gambar 4. 2 Ilustrasi aliran <i>steam</i> pada <i>Economizer</i>	65
Gambar 4. 3 Grafik temperatur pada titik validasi untuk setiap variasi udara pembakaran	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi peringkat Batubara menurut ASTM.....	7
Tabel 2. 2 Analisis khusus dan nilai kalor dari biomassa, batubara, dan gambut representatif	9
Tabel 2. 3 Ultimate & Proximate Batubara	10
Tabel 2. 4 Ultimate & Proximate Biomassa	11
Tabel 2. 5 Properti batubara dan biomasa	36
Tabel 2. 6 Rasio apek pada partikel jerami 6%	37
Tabel 2. 7 Perbandingan data eksperimental dan presiksi numerik pada beban termal 6% dan 12%	38
Tabel 3. 1 Ketentuan injeksi batubara dan biomassa pada masing-masing corne.....	49
Tabel 3. 3 Data Properties batubara.....	50
Tabel 3. 4 Data Properties Biomassa.....	51
Tabel 3. 5 Pengaturan Heat Exchanger pada boiler.....	52
Tabel 3. 6 Boundary condition untuk mill.....	53
Tabel 3. 7 Pengaturan parameter untuk OFA	53
Tabel 3. 8 Pengaturan parameter untuk Outlet boiler.....	54
Tabel 3. 9 Pengaturan parameter untuk inlet secondary air.....	54
Tabel 3. 10 Pengaturan parameter untuk inlet Secondary air Top bottom.....	54
Tabel 3. 11 Pengaturan parameter untuk oil gas.....	55
Tabel 3. 12 Pembebanan Economizer	57
Tabel 3. 13 Pembebanan Tube wall.....	58
Tabel 3. 14 Pembebanan Superheater.....	59
Tabel 3. 15 Pembebanan Reheater	60
Tabel 4. 1 Tabel data kuantitatif Nose & outlet Boiler antara kondisi aktual dan pada kondisi dengan variasi bahan bakar pada PLTU Paiton.....	84

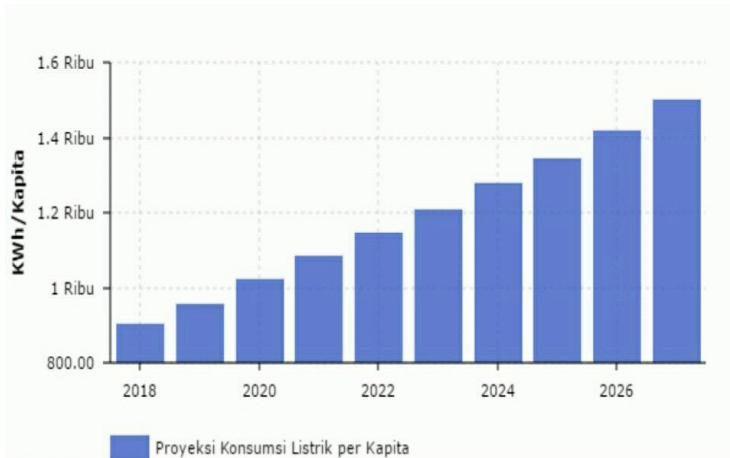
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Jumlah pertumbuhan penduduk di Indonesia telah mengalami perkembangan pesat yang diikuti dengan peningkatan kebutuhan. Oleh karena itu, manusia melakukan berbagai upaya untuk memenuhi kebutuhan dengan cara mengolah sumber daya yang ada. Seperti halnya batubara yang menjadi salah satu gas alam yang diolah untuk memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia. Konsumsi listrik nasional terus menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya akses listrik atau elektrifikasi serta perubahan gaya hidup masyarakat (kementrian ESDM,2018). Bahkan saat ini, batubara menjadi sumber penghasil listrik sebesar 60%, kemudian gas alam sebesar 22%, minyak bumi sebesar 6% dan hanya 12 % yang dihasilkan dari energi terbarukan. Penggunaan batubara sebagai pemasok energi terbesar Indonesia telah membuat alam mendekati kerusakan, pembakaran batubara mengakibatkan kenaikan suhu global bumi yang menyebabkan perubahan iklim dan polusi udara setempat. Pembakaran batubara sebagai energi telah melepaskan gas karbondioksida (CO₂) ke udara sekitar 74% dari emisi total. Salah satu cara untuk mengurangi emisi yang ditimbulkan dari pembakaran batubara serta meningkatkan daya listrik adalah *co-firing* biomassa dengan batubara.

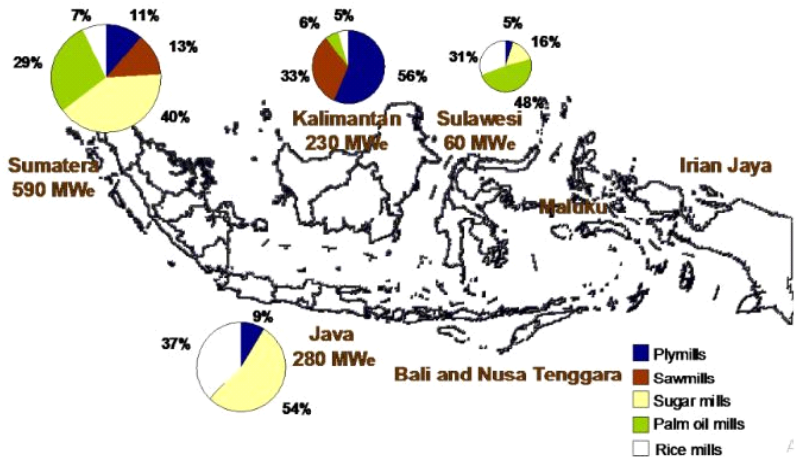


Gambar 1. 1 Proyeksi Konsumsi Listrik Perkapita Indonesia (2018-2027)

Co-firing merupakan kegiatan pembakaran biomassa bersama-sama dengan bahan bakar fosil pada pembangkit listrik berbahan bakar batubara atau gas. *Co-firing* juga dapat digunakan untuk mengembangkan pembakaran bahan bakar dengan *low energy content*. Efisiensi listrik dari sistem *co-firing* biomassa dengan batubara cukup bervariasi mulai dari 35% – 44%. (ETSAP, 2010; IEA 2012, dalam IEA-ETSAP dan IRENA 2013). Sampai sejauh ini biasanya biomassa dicampurkan dalam sistem *co-firing* sebanyak sekitar 5% sampai 10%. Semakin tinggi komposisi biomassa berarti semakin rendah gas rumah kaca (*green house gas* – GHG) yang dihasilkan.

Studi yang dilakukan oleh *Global Carbon Project* pada tahun 2018, menemukan ada 40,9 miliar ton karbondioksida. Selain emisi CO₂, pembangkit listrik batubara juga menimbulkan efek emisi lainnya berupa SO₂, NO₂ dan CO. Selain itu, data dari (ZREU, 2000) menyebutkan bahwa Indonesia memproduksi 146,7 Juta ton atau setara 470 Giga Joule (GJ) biomassa per tahun yang mana sumber utamanya berasal dari residu pertanian yaitu sebesar

150 GJ per tahun dan karet kayu 120 GJ per tahun. Berikut adalah sebaran potensi biomassa di Indonesia.



Gambar 1. 2 Sebaran Potensi Energi Biomassa di Indonesia

Adanya potensi pemanfaatan biomassa dan meningkatnya kebutuhan energi di dunia terkhusus di Indonesia, maka *co-firing* dapat diaplikasikan sebagai solusi produksi listrik. Dengan *co-firing* diharap akan memberikan pengaruh baik terhadap *equipment* lain. Pada PLTU, batubara menjadi sumber terbesar yang digunakan untuk memproduksi *steam superheated* yang nantinya digunakan sebagai penggerak turbin yang berfungsi mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik yang selanjutnya dikonversikan lagi menjadi energi listrik. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai *co-firing* biomassa dengan batubara.

1. 2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang dapat dirumuskan dari uraian latar belakang tersebut antara lain:

Bagaimana pengaruh pengumpanan 5% biomassa dari bahan bakar yang diumpankan terhadap performa pembangkit secara simulasi? Bagaimana hasil perbandingan performa pembangkit antara pembakaran batubara dan pembakaran bersama batubara dengan biomassa?

1. 3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan ingin dicapai dari penelitian ini antara lain:

- a. Mengetahui pengaruh pengumpanan 5% biomassa dari bahan bakar yang diumpankan ke dalam boiler terhadap performa pembangkit secara simulasi.
- b. Membandingkan performa pembangkit antara pembakaran batubara dan pembakaran bersama batubara dengan biomassa.

1. 4 Batasan Masalah

Dalam penulisan tugas akhir ini terdapat beberapa batasan yang digunakan agar pembahasan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan. Batasan tersebut diantaranya:

- a. Batubara yang digunakan adalah sesuai dengan kondisi yang ada dilapangan saat ini, yaitu LRC (*Low rank coal*) dengan nilai kalor 4800 kCal/kg.
- b. Biomassa yang digunakan adalah serbuk kayu dengan nilai kalor 3217 kCal/kg.
- c. *Boiler* beroperasi dalam kondisi *Maximum Continous rate (MCR)* dan menggunakan data pada saat *performance test*.
- d. Persebaran panas yang diamati hanya dari sisi *furnace* saja, tidak termasuk fluida yang ada di dalam pipa-pipa sekeliling *boiler*.
- e. Tidak membahas tentang bagaimana cara memenuhi kebutuhan gas Oksigen.

1. 5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain:

- a. Menambah pengetahuan penulis dan pembaca mengenai *co-firing* biomassa dengan batubara.
- b. Mengetahui pengaruh persentase biomassa terhadap performa pembangkit.
- c. Memberikan gambaran tentang penggunaan *software ansys fluent* untuk simulasi pembakaran pada pembangkit.
- d. Memberikan data hasil simulasi supaya dapat dilakukan pengembangan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bahan Bakar dan Proses Pembakaran

2.1. 1 Bahan Bakar

2.1.1. 1 Batubara

Fungsi bahan bakar pada PLTU adalah untuk memanaskan air di *boiler* hingga menjadi uap. Batubara adalah salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, utamanya adalah sisa-sisa tumbuhan dan terbentuk melalui proses pematubaraan. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen. Batubara juga adalah batuan organik yang memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk.

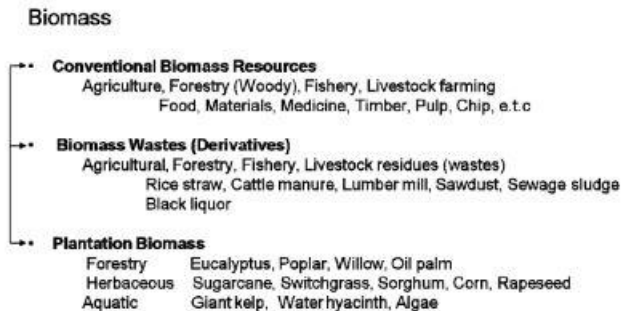
Batubara adalah bahan bakar solid alam yang paling banyak digunakan karena dianggap lebih ekonomis. Batubara diklasifikasikan berdasarkan nilai kalor dan kadar presentase dari *fixed carbon* yang terkandung. Selain itu, faktor *volatile matter*, lama penyalaan dan suhu juga memegang peranan yang penting. *American Standard for Testing and Materials (ASTM)* membuat klasifikasi batubara yang umum digunakan dalam industri, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2. 1 Klasifikasi peringkat Batubara menurut ASTM

Class	Group	Fixed Carbon Limits (% Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Volatile Matter Limits (% Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Calorific Value Limits (Btu/lb, Moist, Mineral-Matter-Free Basis) ^b		Agglomerating Character
		=	<	>	=	=	<	
I. Anthracite	1. Metaanthracite	98	-	-	2	-	-	Non Agglomerating
	2. Anthracite	92	98	2	8	-	-	
	3. Semianthracite ^c	86	92	8	14	-	-	
II. Bituminous	1. Low-volatile bituminous coal	78	86	14	22	-	-	Commonly Agglomerating ^d
	2. Medium- volatile bituminous coal	69	78	22	31	-	-	
	3. High-volatile A bituminous coal	-	69	31	-	14.000 ^d	-	
	4. High-volatile B bituminous coal	-	-	-	-	13.000	14.000	
	5. High-volatile C bituminous coal	-	-	-	-	11.500	13.000	
III. Subbituminous	1. Subbituminous A coal	-	-	-	-	10.500	11.500	Non Agglomerating
	2. Subbituminous B coal	-	-	-	-	9.500	10.500	
	3. Subbituminous C coal	-	-	-	-	8.300	9.500	
IV. Lignite	1. Lignite A	-	-	-	-	6.300	8.300	Non Agglomerating
	2. Lignite B	-	-	-	-	-	6.300	

2.1.1. 2 Biomassa

Secara umum biomassa merupakan bahan yang dapat diperoleh dari tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai energi atau bahan dalam jumlah yang besar. Secara tidak langsung mengacu pada produk yang diperoleh melalui peternakan dan industri makanan. Biomassa secara spesifik berarti kayu, eceng gondok, serbuk gergaji, serpihan kayu, jerami, sekam padi, lumpur pulp, kotoran hewan, dan lain-lain.



Gambar 2. 1 Kategori biomassa (berdasarkan penggunaan dan aplikasi)

Bahan bakar biomassa juga menghasilkan CO₂ melalui pembakaran. Akan tetapi, CO₂ akan diserap oleh tumbuhan semasa proses pertumbuhan. Walaupun batubara juga berasal dari biomassa, namun kisaran karbonnya berada dalam jangka waktu yang panjang, yaitu beberapa juta tahun.

Tabel 2. 2 Analisis khusus dan nilai kalor dari biomassa, batubara, dan gambut representatif

Kategori	Biomassa	Kadar air* [%bobot]	Bahan organik [%berat kering]	Abu** [%bobot]	Nilai kalor tinggi [MJ/kering-kg]
Limbah	Pupuk kandang sapi	20-70	76.5	23.5	13.4
	Padatan bio (biosolid) teraktivasi	90-97	76.5	23.5	18.3
	Bahan bakar yang diperoleh dari sampah, <i>Refuse-derived fuel</i> (RDF)	15-30	86.1	13.9	12.7
	Serbuk gergaji	15-60	99.0	1.0	20.5
Tanaman herba	Sorgum manis	20-70	91.0	9.0	17.6
	Rumput Switch	30-70	89.9	10.1	18.0
Tanaman perairan	Rumput laut cokelat raksasa	85-97	54.2	45.8	10.3
	Eceng gondok	85-97	77.3	22.7	16.0
Tanaman kayu	Kayu putih	30-60	97.6	2.4	18.7
	Hibrid poplar	30-60	99.0	1.0	19.5
	Sycamore	30-60	99.8	0.2	21.0
Turunan	Kertas	3-13	94.0	6.0	17.6
	Kulit pinus	5-30	97.1	2.9	20.1
	Jerami	5-15	80.8	19.2	15.2
Batu bara	Bitumen illinois	5-10	91.3	8.7	28.3
Gambut	Teiki reed	70-90	92.3	7.7	20.8

Meskipun energi dari biomassa umumnya tidak kompetitif dari segi biaya jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil dengan teknologi dan kondisi pasar saat ini, namun produksi biomassa untuk bahan baku dan energi akan menghasilkan berbagai manfaat. Beberapa manfaat yang signifikan adalah mengimbangi emisi gas rumah kaca dari pembakaran bahan bakar fosil, menciptakan lapangan pekerjaan dan pendapatan melalui pengembangan industri baru dan pemanfaatan bahan baku lokal serta

meningkatkan keamanan energi dengan mengurangi ketergantungan terhadap barang impor.

2.1.1. 3 Ultimate dan Proximate Analisis Bahan Bakar

Tabel 2. 3 Ultimate & Proximate Batubara

ULTIMATE ANALYSIS	
Data	Nilai
Moisture	28.22%
Ash	1.92%
C	51.35%
H	4.61%
O	13.06%
N	0.7%
S	0.14%
HHV	4772 kCal/kg
PROXIMATE ANALYSIS	
Data	Nilai
Fixed Carbon	33.58%
Volatile Matter	36.28%
Ash	1.92%
Moisture	28.22

Tabel 2.3 menunjukkan analisis Ultimate dan Proximate dari batubara dengan nilai kalor yang digunakan sebesar 4800 kCal/kg.

Tabel 2. 4 Ultimate & Proximate Biomassa

ULTIMATE ANALYSIS	
Data	Nilai
Moisture	30.84%
Ash	3.99%
C	33.20%
H	3.84%
O	27.04%
N	1.00%
S	0.07%
HHV	3217 kCal/kg
PROXIMATE ANALYSIS	
Data	Nilai
Fixed Carbon	12.60%
Volatile Matter	52.40%
Ash	4%
Moisture	31%

Tabel 2.4 menunjukkan analisis Ultimate dan Proximate dari biomassa dengan nilai kalor yang digunakan sebesar 3217 kCal/kg.

2.1. 2 Proses Pembakaran

2.1.2. 1 Pembakaran

Secara umum, Pembakaran adalah suatu runutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar (*fuel*) dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang kadang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau nyala. Bahan bakar (*fuel*) adalah suatu materi apapun yang bisa diubah menjadi energi. Kebanyakan bahan bakar digunakan manusia melalui proses pembakaran (reaksi redoks) di

mana bahan bakar tersebut akan melepaskan panas setelah direaksikan dengan oksigen di udara dan secara umum mengandung unsur- unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N) dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah spesies kimia yang menghilangkan elektron dari spesies lainnya.

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Pembakaran sempurna dapat dicapai dengan mengontrol 4 faktor yang lebih dikenal dengan *T3O* yaitu:

Temperature, suhu yang cukup untuk menyalakan dan menjaga penyalaan bahan bakar

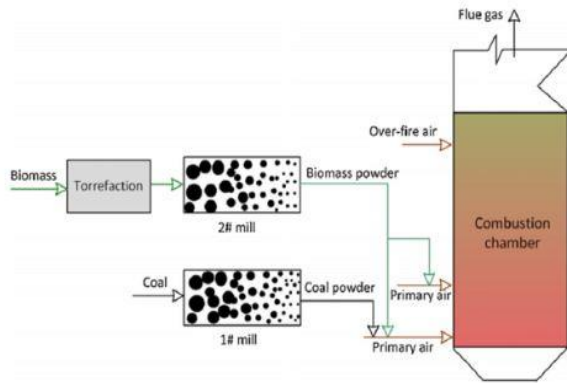
Turbulence, turbulensi atau pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik. Supaya terjadi pencampuran sempurna, kecepatan gas berkisar 4.5-7.5 m/s

Time, waktu yang cukup untuk pembakaran yang sempurna. Karena untuk pembentukan reaksi yang sempurna tidak sederhana dan menyangkut banyak tahapan reaksi, waktu pembakaran juga mempengaruhi dimensi ruang bakar

Oxygen, gas oksigen adalah salah satu penentu hasil pembakaran.

2.1.2. 2 Co-firing

Co-firing adalah pembakaran dua (atau lebih) jenis material yang berbeda secara bersamaan, dimana biomassa dibakar bersama-sama dengan batubara di pembangkit listrik termal dan sebagainya. Salah satu keuntungan dari pembakaran bersama adalah bahwa pabrik yang ada dapat digunakan untuk membakar bahan bakar baru, yang mungkin lebih murah atau lebih ramah lingkungan serta hanya membutuhkan modifikasi yang kecil terhadap alat yang ada untuk memungkinkan perawatan biomassa dan pembakaran biomassa di fasilitas pembakaran skala besar dengan efisiensi yang tinggi.



Gambar 2. 2 Proses co-firing batubara dengan dengan biomassa

2.1. 3 Mekanisme Pembakaran Batubara

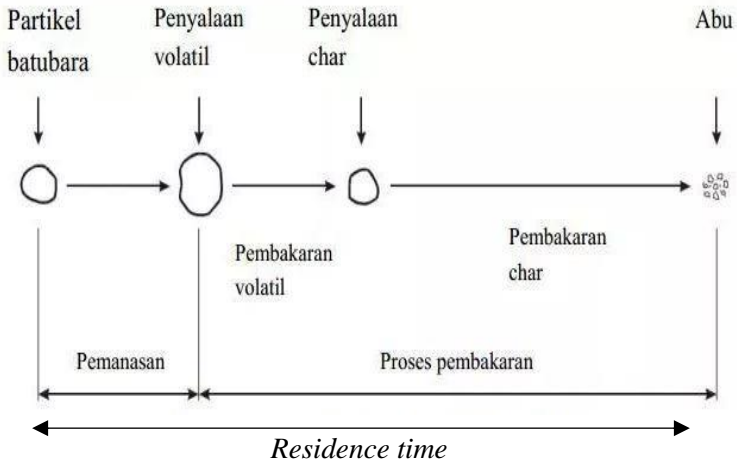
Pembakaran batubara yang terjadi di *furnace* pada *boiler* memiliki beberapa tahapan proses dari awal masuknya batubara sampai batubara terbakar habis di dalam *furnace*. Batubara memiliki nilai kalor yang cukup potensial sebagai bahan bakar padat, dan proses pembakaran bahan bakar padat jauh lebih kompleks daripada bahan bakar cair ataupun gas, dan akan melewati beberapa tahapan sebagai berikut:

Drying, proses awal batubara sebelum bercampur dengan udara pembakaran di *furnace* yang bertujuan untuk menghilangkan *moisture* yang terkandung baik di permukaan ataupun di pori-pori batubara. Proses ini terjadi saat batubara bercampur dengan *air primary* di *pulverizer/mill*.

Devolatilization, merupakan proses pemisahan antara *volatile matter* dan *char (fixed carbon)*. Dimana *volatile matter* akan mengalami penguapan pada suhu sekitar 900 °C – 950 °C menyisakan *char* yang merupakan karbon padat yang menjadi bahan bakar utama dalam proses pembakaran di *furnace*.

Char Combustion, proses pembakaran karbon padat dengan oksigen baik dari udara pembakaran maupun dari gas hasil *devolatilization*.

Waktu tinggal batubara sampai habis terbakar di dalam *furnace* disebut *residence time*, merupakan jumlah waktu yang diperlukan batubara untuk mengalami proses *drying*, *devolatilization*, dan *char combustion* dalam *furnace*. Dari gambar 2.3 dapat dilihat bahwa *residence time* sendiri sangat dipengaruhi oleh komponen partikel batubara. Proses pembakaran batubara dengan metode *tangentially-fired* akan membuat batubara lebih cepat mengalami pembakaran, karena pola aliran pembakaran yang dihasilkan sangat turbulen, sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna. Pembakaran yang sempurna akan mengurangi terjadinya *slagging* maupun *fouling* pada *superheater*. (Singer, JG, 1993)



Gambar 2. 3 Proses pembakaran batubara

2. 1 Sistem Pembakaran pada Boiler

2.2. 1 Tangentially-fired Pulverizer Coal Combustion

Pembakaran tangensial merupakan salah satu sistem pembakaran yang dilakukan pada *pulverized fuel boiler*. Pada umumnya menggunakan 4 (empat) buah titik pembakaran (*burner*) dari masing-masing sudut (*corner*) yang ditunjukkan pada gambar 2.4, berfungsi untuk menciptakan bola api (*fire ball*) pada pusat *furnace*. Pada masing-masing *corner* memiliki *burner* yang bertingkat.

Pembakaran tangensial (gambar 2.4) memiliki kekurangan, yaitu pada pengaturan sudut pembakaran dan apabila ada gangguan pada *burner* akan mengakibatkan ketidakstabilan pembentukan lingkaran bola api (*fire ball*). Namun juga memiliki beberapa kelebihan yang menjadikannya banyak diminati dalam pemilihan sistem pembakaran *pulverizer boiler*, yaitu:

Pencampuran bahan bakar dan udara yang baik sehingga pembakaran yang terjadi hampir sempurna dan distribusi *temperatur* lebih rata.

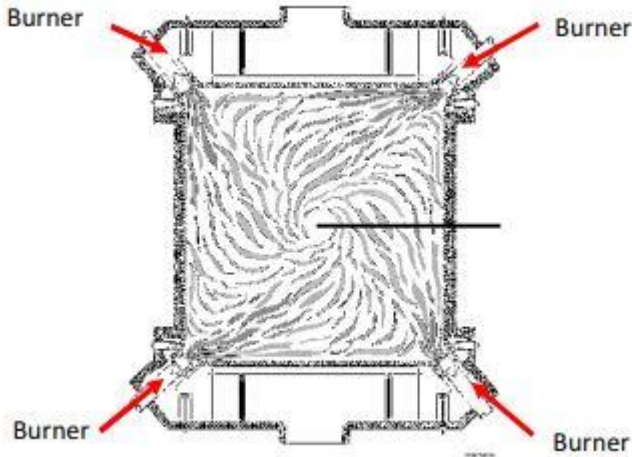
Heat flux yang seragam di dinding ruang pembakaran sehingga kegagalan akibat tingginya tegangan termal dapat diminimalis.

Aliran udara dan bahan bakar dapat diarahkan, baik keatas atau kebawah sehingga dapat memvariasikan panas yang diserap dinding ruang pembakaran serta mengontrol suhu pada *superheater*.

Vortex motion pada tengah *furnace* mengurangi terjadinya erosi dan *local- overheating* pada dinding *furnace*.

Emisi NOx yang dihasilkan lebih rendah dari proses pembakaran lainnya

Menghasilkan *fly ash* hanya 15% - 40% dari keseluruhan abu *Carbon Loss* lebih rendah dan dapat digunakan untuk proses pembakaran bahan bakar yang memiliki nilai kalor rendah.



Gambar 2. 4 Pembakaran tangensial pada pulverizer boiler

2.2. 2 Over Fire Air (OFA)

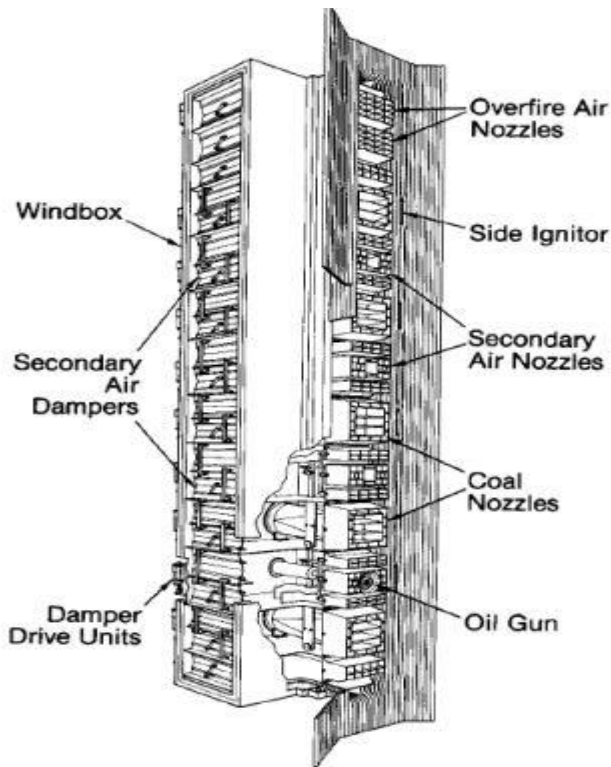
Pada gambar 2.5 tampak jelas bagian-bagian dari *furnace*. *Secondary air* merupakan saluran pembawa udara pembakaran dari *forced draft fan* (FD Fan), sedangkan *coal nozzle* adalah saluran pembawa batubara di *pulverizer/coal mill* yang dibawa oleh udara *transport* dari *primary air fan* (PA Fan), termasuk juga *over fire air* (OFA).

Pembakaran dengan menggunakan *over fire air* adalah proses pembakaran pada *primary combustion zone* menggunakan suplai udara pembakaran yang kurang dari udara teoritis yang dibutuhkan. Sisa udara tersebut di injeksikan ke dalam ruang pembakaran melalui *over fire air* (OFA).

Pada *boiler* dengan pembakaran tangensial ini terdapat 2 (dua) macam *over fire air* yaitu *close coupled over fire air* (CCOFA) yang menggunakan *windbox* yang sama untuk udara pembakaran utama, dan *port* untuk *over fire air* tersebut berdekatan

dengan susunan *burner*. Sementara itu, untuk *seperated over fire air* (SOFA) menggunakan *windbox* yang terpisah dengan *winbox burner*, dan untuk *port over fire air* tersebut terpisah beberapa jarak dengan susunan *burner*.

Diperlukan adanya kontrol terhadap udara yang di injeksikan pada *over fire air* agar tidak terjadi peningkatan pembentukan CO dan emisi hidrokarbon, serta karbon yang tidak terbakar pada *fly ash*. Penggunaan *over fire air* juga menyebabkan pembakaran pada *furnace* lebih rendah, sehingga menyebabkan korosi dan suhu gas buang meningkat.



Gambar 2. 5 Bagian-bagian dari furnace boiler

2. 2 Efisiensi Boiler

Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara *output* terhadap *input* dalam suatu proses. Efisiensi merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik konversi energi atau proses *transfer* terjadi.

PLTU dirancang untuk menghasilkan *output* berupa energi listrik dalam besaran tertentu untuk sejumlah *input* berupa bahan bakar dalam jumlah tertentu pula. Bila seluruh komponen PLTU memiliki efisiensi yang tinggi, maka unjuk kerja (*performance*) PLTU tersebut dikatakan tinggi sehingga biaya operasi PLTU juga menjadi rendah.

Untuk perhitungan efisiensi *boiler* pembangkit listrik berdasarkan pada *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) PTC 4.1. Ada 2 (dua) metode yang digunakan, yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*).

2.3. 1 Metode Langsung (Direct Method)

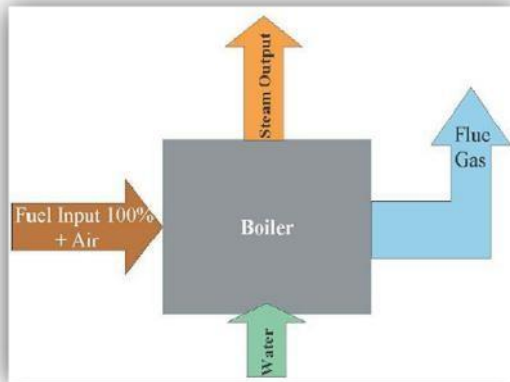
Metode perhitungan efisiensi *boiler* secara langsung biasa dikenal juga sebagai “*input-output method*”, yaitu perhitungan efisiensi secara cepat dengan menggunakan perbandingan antara fluida kerja (air dan uap) dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar sesuai dengan ilustrasi pada gambar 2.6. Hanya saja pada metode langsung ini tidak diberikan penjelasan secara langsung mengenai rendahnya efisiensi karena tidak dapat dihitung kerugian-kerugian yang mempengaruhi efisiensi tersebut. Adapun nilai efisiensi *boiler* dapat dievaluasi menggunakan rumus berikut:

$$\dots\dots\dots(\quad \text{Boiler efisiensi, } \eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \quad 2.1)$$

$$\eta = \frac{\text{Heat in steam output}}{\text{Heat in fuel input}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Data yang diperlukan untuk pengujian metode langsung ini adalah sebagai berikut:

- a. *Heat Input*
 - *Jenis bahan bakar*
 - *Jumlah bahan bakar*
 - *Nilai kalor bahan bakar*
- b. *Heat Output*
 - *Jumlah steam yang dihasilkan*
 - *Tekanan/temperatur steam*
 - *Entalpi steam*
 - *Tekanan/temperatur feed water*
 - *Entalpi feed water*



Gambar 2. 6 Diagram Metode Langsung (*Direct Method*)

$$\text{Boiler efficiency, } \eta = \frac{Q(H-h)}{q \times \text{GCV}} \times 100\%$$

Dengan :

Q = Jumlah *steam* yang dihasilkan (Kg/Jam)

Q = Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (Kg/Jam)

GCV = Nilai kalori bahan bakar (Kcal/Kg)

H = Entalpi *steam* (Kcal/Kg)

H = Entalpi *feed water* (Kcal/Kg)

2.3. 2 Metode Tak Langsung (Indirect Method)

Untuk menentukan efisiensi *boiler* dengan metode tidak langsung (*Indirect Method*), semua bentuk energi hilang (*losses*) yang terjadi pada *boiler* harus dihitung. Kehilangan-kehilangan tersebut berhubungan dengan jumlah bahan bakar yang dibakar, seperti yang tampak pada gambar 2.7. Dengan metode ini, akan sangat mudah untuk membandingkan hasil perhitungan berbagai *boiler* pada berbagai laju pembebanan.

$$\text{Efisiensi Boiler} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8)$$

Dengan,

L_1 = *Heat loss* akibat *dry flue gas*

L_2 = *Heat loss* akibat evaporasi dari air yang terbentuk karena keberadaan H_2 di dalam bahan bakar (%)

L_3 = *Heat loss* akibat keberadaan air dalam bahan bakar

L_4 = *Heat loss* akibat keberadaan air dalam udara

L_5 = *Heat loss* akibat pembakaran yang tidak sempurna

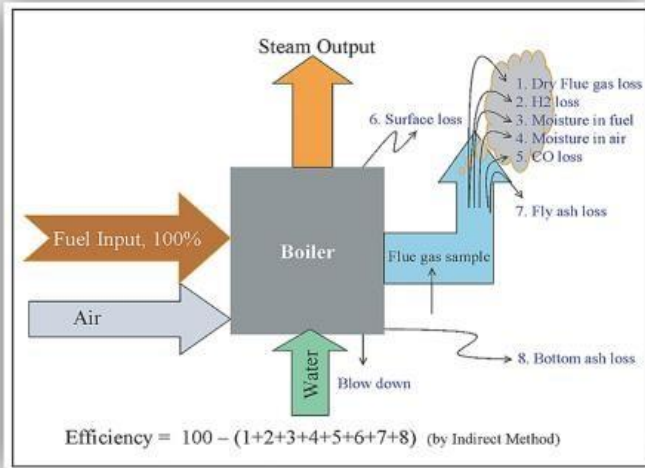
L_6 = *Heat loss* akibat radiasi dan konveksi

L_7 = *Heat loss* akibat senyawa tak terbakar di *fly ash* (%)

L_8 = *Heat loss* akibat senyawa tak terbakar di *bottom ash* (%)

Untuk menghitung efisiensi *boiler* dengan metode tidak langsung terlebih dulu dilakukan perhitungan *stoichiometric air*

fuel ratio dan *excess air*. Berikut adalah gambar diagram dari *indirect method* :



Gambar 2. 7 Diagram Metode Tak Langsung (Indirect Method)

Berbagai bentuk hilangnya energi (*heat losses*) yang berhubungan dengan operasi *boiler* dapat ditentukan melalui berbagai rumus berikut ini.

a. *Heat loss* akibat *dry flue gas*

Bentuk hilang energi ini merupakan yang paling besar dan dapat ditentukan melalui rumus berikut:

$$L_1 = \frac{m \times Cp \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahanbakar}} \times 10 \dots \dots \dots (2.5)$$

Dengan,

m = massa *dry flue gas* dalam kg/kg bahan bakar
 = produk pembakaran bahan bakar : CO₂ + SO₂ + N₂ dlm
 bahan bakar + N₂ dari udara + O₂ dalam *flue gas*

C_p = Kapasitas panas dalam Kcal/Kg

T_f = *Temperatur flue gas* dalam °C

T_a = *Temperatur ambient* dalam °C

- b. *Heat loss* akibat evaporasi dari air yang terbentuk karena keberadaan gas H_2 di dalam bahan bakar (*fuel*), (%)

Pembakaran dari hidrogen menyebabkan hilang energi karena produk pembakaran tersebut salah satunya adalah air. Air ini dikonversi menjadi *steam* dan menyebabkan hilangnya energi yang sebanding dengan kalor latennya.

$$L_2 = \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_p \times (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahanbakar}} \times 100 \quad \dots (2.6)$$

Dengan,

H_2 = kg hidrogen yang ada dalam 1 kg bahan bakar

C_p = Kapasitas panas dari *superheated steam* dalam Kcal/Kg°C

T_f = *Temperatur flue gas* dalam °C

T_a = *Temperatur ambient* dalam °C

584 = Kalor laten air

- c. *Heat loss* akibat keberadaan air dalam bahan bakar

Air yang memasuki *boiler* dengan bahan bakar yang keluar sebagai uap *superheated*. Kandungan air ini dihasilkan dari panas sensibel yang akan mengubah air tersebut menjadi uap pada titik didihnya, kalor laten dari evaporasi air, dan panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur *steam* hingga mencapai temperatur gas keluar (*exhaust gas*). Bentuk hilang energi ini dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$L_3 = \frac{M \times \{584 + C_p \times (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahanbakar}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan,

M = kg air yang ada dalam 1 kg bahan bakar

C_p = Kapasitas panas dari *superheated steam* dalam Kcal/Kg°C

T_f = *Temperatur flue gas* dalam °C

T_a = Temperatur ambient dalam °C

584 = Kalor laten air

d. *Heat loss* akibat keberadaan air dalam udara

Uap yang terbentuk akibat kelembaban yang dibawa udara merupakan uap *superheated* karena uap tersebut melewati *boiler*. Karena panas tersebut melalui bagian cerobong (*stack*), maka harus diperhitungkan sebagai salah satu bentuk hilang energi. Untuk menghubungkan bentuk hilang energi ini dengan massa dari bahan bakar yang dibakar, kandungan air dalam udara pembakaran dan jumlah udara yang dipasok untuk tiap unit massa dari bahan bakar harus diketahui.

$$L_4 = \frac{AAS \times \text{humidity factor} \times C_p \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahanbakar}} \times 100 \quad \dots\dots (2.8)$$

Dengan,

AAS = massa aktual dari udara yang dipasok per kg bahan bakar

Humidity factor = Kg air/Kg udara kering

C_p = Kapasitas panas dari *superheated stea* dalam Kcal/Kg°C

T_f = Temperatur *flue gas* dalam °C

T_a = Temperatur *ambient* dalam °C

e. *Heat loss* akibat pembakaran yang tidak sempurna

Produk yang terbentuk dari pembakaran yang tidak sempurna dapat dicampur dengan oksigen dan dibakar kembali dengan menghasilkan sejumlah energi. Sejumlah produk yang terlibat meliputi gas CO, H₂ dan berbagai senyawa hidrokarbon lain serta secara umum ditemukan di dalam *flue gas* dari *boiler*. Gas CO merupakan satu-satunya gas dengan konsentrasi yang dapat ditentukan dengan mudah melalui uji *boiler*.

$$L_5 = \frac{\% CO \times C}{\% CO + \% CO_2} \times \frac{5744}{GCV \text{ bahanbakar}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan,

M = kg air yang ada dalam 1 kg bahan bakar

C_p = Kapasitas panas dari *superheated steam* dalam Kcal/Kg°C

T_f = *Temperatur flue gas* dalam °C

T_a = *Temperatur ambient* dalam °C

584 = Kalor laten air

f. *Heat loss* akibat radiasi dan konveksi

Umumnya, bentuk hilang energi akibat perpindahan panas secara konveksi dan radiasi diasumsikan berdasarkan jenis dan dimensi dari *boiler* seperti contoh berikut :

- Untuk *fire tube/ packaged boiler* industrial = 1,5% – 2,5%
- Untuk *water tube boiler* industrial = 2% – 3%
- Untuk *power station boiler* = 0,4% – 1%

Akan tetapi, bentuk hilang energi ini dapat ditentukan apabila luas dan *temperatur* permukaan dari *boiler* tersebut diketahui melalui perhitungan berikut ini:

$$L_6 = 0.548 \times \left[\frac{T_s^4}{55.55^4} - \frac{T_a^4}{55.55^4} \right] + 1.957 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{(196.85 V_m + 68.9)}{68.9}} \quad \dots (2.10)$$

Dengan,

L_6 = Hilang energi akibat radiasi dalam W/m²

V_m = Kecepatan angin dalam m/s

T_s = *Temperatur flue gas* dalam K

T_a = *Temperatur ambient* dalam K

- g. *Heat loss* akibat senyawa tak terbakar di *fly ash* (%)

$$L_7 = \frac{\text{jumlah abu}}{\text{Kg bahanbakar}} \times \text{GCV flyash} \\ \text{GCV bahanbakar} \times 100 \quad \text{.. (2.11)}$$

- h. *Heat loss* akibat senyawa tak terbakar di *bottom ash* (%)

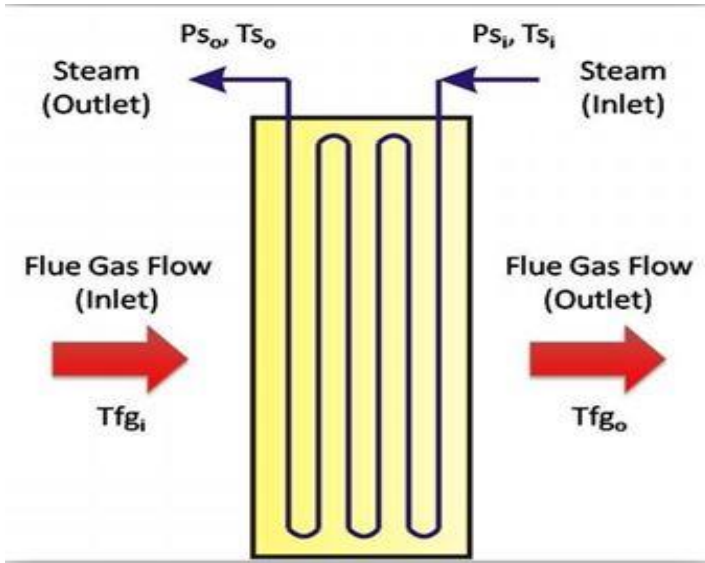
$$L_8 = \frac{\text{jumlah abu}}{\text{Kg bahanbakar}} \times \text{GCV bottomash} \\ \text{GCV bahanbakar} \times 100 \quad \text{.. (2.12)}$$

- i. *Uncounted Loss*

Uncounted Losses merupakan *losses* pada *boiler* yang sulit dihitung. Salah satu contoh *uncounted losses* yaitu *heat loss* yang terkandung pada *soot* dan *slag*, memang secara perhitungan diasumsikan *soot* dan *slag* akan ikut masuk dalam *ash hopper* yaitu ketika proses *soot blowing* dan dihitung bersama dengan *heat loss* pada *bottom ash*, tapi kemungkinan masih banyak menempel pada *tube boiler* masih cukup besar hal ini terlihat saat *overhaul* terdapat *soot* dan *slag* yang cukup banyak pada *tube boiler*. Pada PLTU Rembang ditetapkan *uncounted loss* sebesar 0.23%.

2. 3 Perhitungan Panas yang Diserap Heat Exchanger

Heat exchanger dan *water-wall tube* di dalam *furnace* bertugas untuk menyerap panas dari hasil pembakaran dan *flue gas*. Adapun panas yang didapatkan yaitu berasal dari *flue gas* hasil pembakaran batubara. Penyerapan panas oleh *heat exchanger* diilustrasikan dengan gambar 2.8 dibawah ini:



Gambar 2. 8 Heat exchanger

2. 4 Simulasi Pembakaran Batubara didalam Ruang Bakar Generator Uap

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

- Persamaan kekekalan massa (kontinuitas)
- Persamaan kekekalan momentum
- Persamaan kekekalan energi

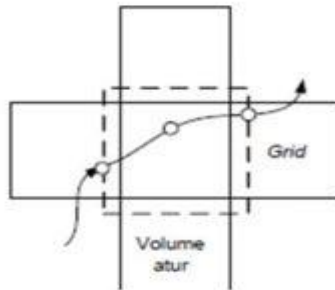
Persamaan-persamaan tersebut selanjutnya akan diselesaikan secara numerik dengan bantuan perangkat lunak.

2.5. 1 Persamaan Kekekalan Massa (kontinuitas)

Persamaan kontinuitas yang diterapkan adalah:

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

Persamaan diatas adalah persamaan umum kontinuitas untuk aliran *incompressible* maupun *compressible*.



Gambar 2. 9 Ilustrasi simulasi transfer massa, momentum, dan energi fasa diskrit dengan fasa kontinu

S_m adalah sumber massa (*mass source*) dari fasa diskrit ataupun reaksi spesies. Interaksi massa, momentum, dan energi fasa kontinu dengan fasa diskrit dijelaskan dalam gambar 2.9.

2.5. 2 Persamaan kekekalan momentum

Persamaan umum kekekalan momentum dalam arah i untuk fasa kontinu diberikan dalam persamaan:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}. \quad (2.17)$$

dengan p adalah tekanan statis, τ_{ij} adalah tensor tegangan geser, ρg_i dan F_i adalah pengaruh gaya *eksternal* atau gaya luar. Tensor tegangan geser dinyatakan sebagai:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

Dengan μ adalah viskositas molekular dan T_{ij} adalah tensor satuan.

2.5. 3 Persamaan kekekalan energi

Persamaan umum kekekalan energi dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla [\vec{v} (\rho E + p)] = - \vec{v} (\sum_j h_j j_j) + S_h$$

Dimana jumlah *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 antara fasa kontinu dengan fasa diskrit, dan *fluks* energi. Pengaruh energi potensial dan kinetik diwakili oleh E pada suku kedua ruas kiri.

2. 5 Software Ansys Fluent

Fluent berisi kemampuan pemodelan fisik yang luas yang diperlukan untuk memodelkan aliran, turbulensi, perpindahan panas, dan reaksi untuk aplikasi industri. *Fluent* mencakup rentang yang luas, termasuk khusus, dengan kemampuan untuk memodelkan pembakaran dalam silinder, sistem turbo dan sistem *multifase*.

Fluent juga menawarkan komputasi kerja tinggi yang sangat skalabel untuk membantu menyelesaikan simulasi, dinamika fluida komputasional model besar yang cepat dan hemat biaya.

Fitur meliputi:

- Memberikan solusi lengkap dalam satu jendela *fluent*
- Merampingkan alur kerja *fluent* untuk menghasilkan *mesh* yang diimpor
- Menghapus hambatan untuk tugas umum

Langkah langkah sebagai berikut:

1. Tahap Identifikasi masalah

Menentukan tujuan yang akan dicapai atau hasil yang diharapkan dari simulasi.

Menentukan domain fluida. Terkait dengan akurasi hasil simulasi yang kita harapkan dan lama waktu simulasi.

2. Tahap *preprocessing*

Membuat geometri. Menentukan permasalahan yang akan disimulasikan dengan 2 dimensi atau 3 dimensi dan sebagian benda atau keseluruhan.

Meshing. Menentukan tipe mesh yang akan digunakan.

Menentukan material properties fluida, physical models, boundary condition, turbulence modelling, dll.

Pengaturan solver (numerical schemes, convergences controls, convergence monitor, dll).

3. Tahap *solution*

Hasil simulasi akan diselesaikan secara *iterative* sampai mencapai kondisi konvergen

4. Tahap *postprocessing*

Pada tahap ini akan didapatkan Hasil dari simulasi yang dilakukan, dapat berupa plot vektor kecepatan, kontur distribusi tekanan, dll.

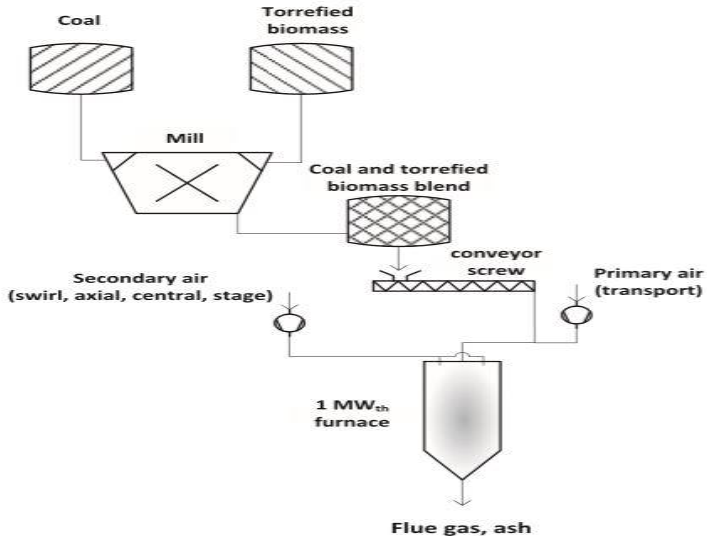
2. 6 Penelitian terdahulu

2.7. 1 Penelitian Alexander Stroh

3-D numerical simulation for co-firing of torrefied biomass in a pulverized-fired 1 MWth combustion chamber

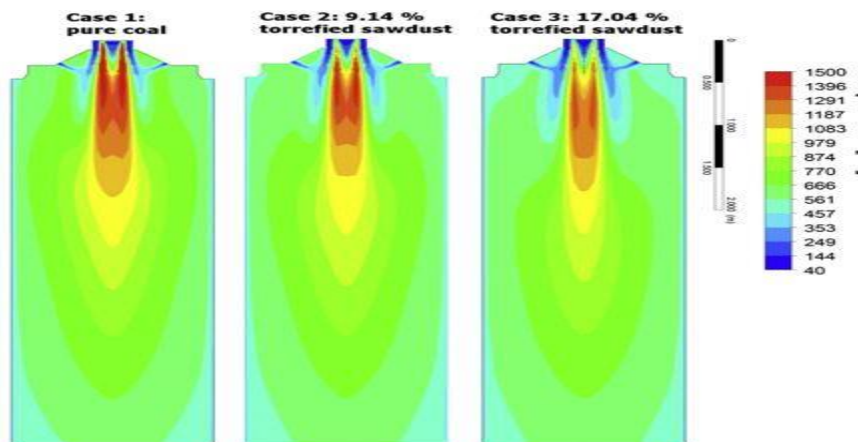
Penelitian ini dilakukan oleh Alexander Stroh, Falah Alobaid, Jan-Peter Busch, Jochen Strohle dan Bernd Eppel dari *Technical University Darmstadt*, German tahun 2015. Pada penelitian ini kekuatan termal selama percobaan dijaga konstan pada 500 kWth. Untuk penelitian ini, menggunakan biomassa berupa serbuk gergaji yang sebelumnya telah dibakar dalam

reaktor rotatory drum yang dipanaskan pada 260 C selama sekitar 10 menit.



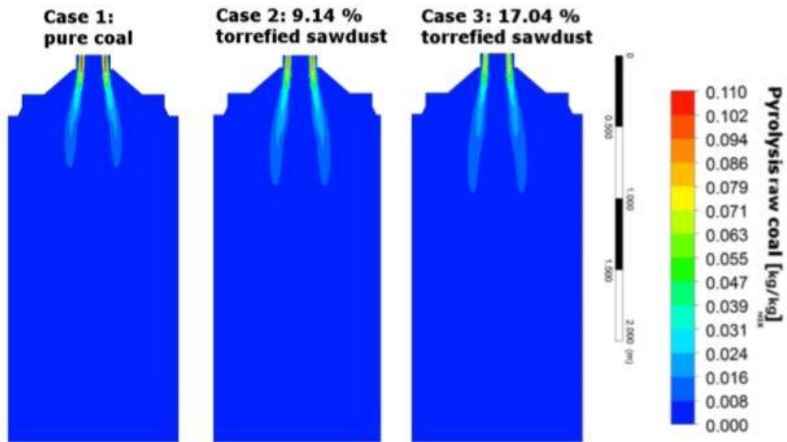
Gambar 2. 10 Skema proses fasilitas tes 1 MW_{th}

Sebuah wadah aluminium oksida diisi dengan 20 mg biomassa dan ditempatkan di dalam oven. Setelah oven dibersihkan dengan nitrogen, laju pemanasan 10 K/ menit diterapkan untuk meningkatkan suhu sampel menjadi 900 C. suhu ini dipertahankan selama sekitar 30 menit. Data eksperimental dari perangkat TGA diselidiki, terutama kurva untuk menentukan reaksi kinetik untuk tiga komponen hemiselulosa, selulosa dan lignin.



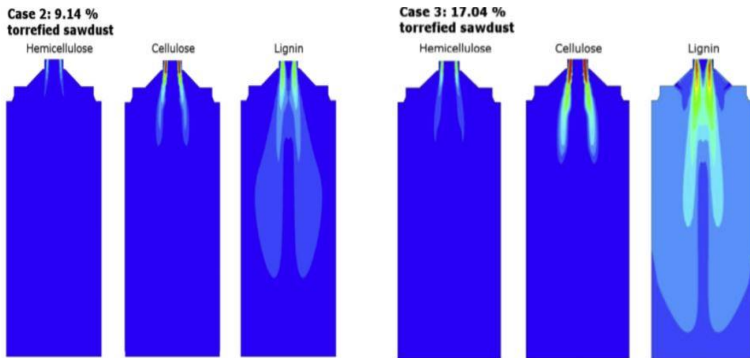
Gambar 2. 11 *Distribusi temperatur semua campuran bahan bakar*

Distribusi temperatur untuk semua campuran bahan bakar ditunjukkan pada gambar 2.11. Untuk kasus batubara murni, suhu gas maksimum mencapai sekitar 1500 C dan terletak disekitar inlet bahan bakar. Temperaturnya berkurang secara relatif cepat hingga sekitar 1000 C tingginya sekitar 2 m dari reaktor dan sekitar 600 C dimasing-masing saluran keluar bahan bakar. Co-firing serbuk gergaji mengurangi suhu maksimum menjadi sekitar 1300 C. Selama operasi dalam beban parsial suhu dinding tetap dijaga konstan.



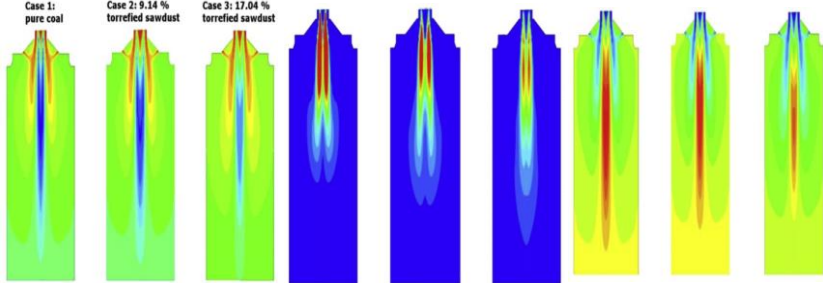
Gambar 2. 12 Pirolisis batubara mentah untuk semua campuran bahan bakar

Perilaku pirolisis komponen batubara mentah untuk semua kasus dibandingkan pada gambar 2.12. Hasil menunjukkan, bahwa reaksi pirolisis batubara mentah lebih lambat untuk campuran biomassa daripada batubara murni. Efek ini disebabkan oleh panas reaksi selama reaksi pirolisis biomassa lebih kecil karena nilai kalor yang lebih rendah, energi aktivasi untuk reaksi oksidasi campuran lebih tinggi dibandingkan dengan batubara dan ukuran partikel memiliki pengaruh terhadap dekomposisi bahan bakar.



Gambar 2. 13 Reaksi pirolisis komponen biomassa

Pada gambar 2.13 Ditunjukkan bahwa pada komponen biomassa hemiselulosa, selulosa dan lignin, menghasilkan laju pirolisis yang berbeda karena devolatilisasi dan fraksi massa yang berbeda. Hemiselulosa hanya memiliki proporsi kecil serbuk gergaji dan laju dekomposisi cepat. Selulosa mewakili sebagian besar serbuk gergaji dan terurai sekitar 0.7 m dari lubang masuk ruang bakar. Lignin memiliki laju reaksi pirolisis paling lambat. Untuk kasus campuran bahan bakar kedua, lignin terurai sekitar 2 m, sedangkan untuk campuran bahan bakar kasus 3, sebagian kecil residu lignin tetap berada di saluran keluar ruang bakar. Hemiselulosa memiliki fraksi massa terkecil dari biomassa, sehingga pirolisis hemiselulosa relatif lebih cepat di antara semua komponen biomassa. Sementara, lignin memiliki faktor pra-eksponensial yang lebih rendah, yang merupakan alasan utama untuk dekomposisi yang lambat.



Gambar 2. 14 Distribusi gas buang untuk semua campuran bahan bakar

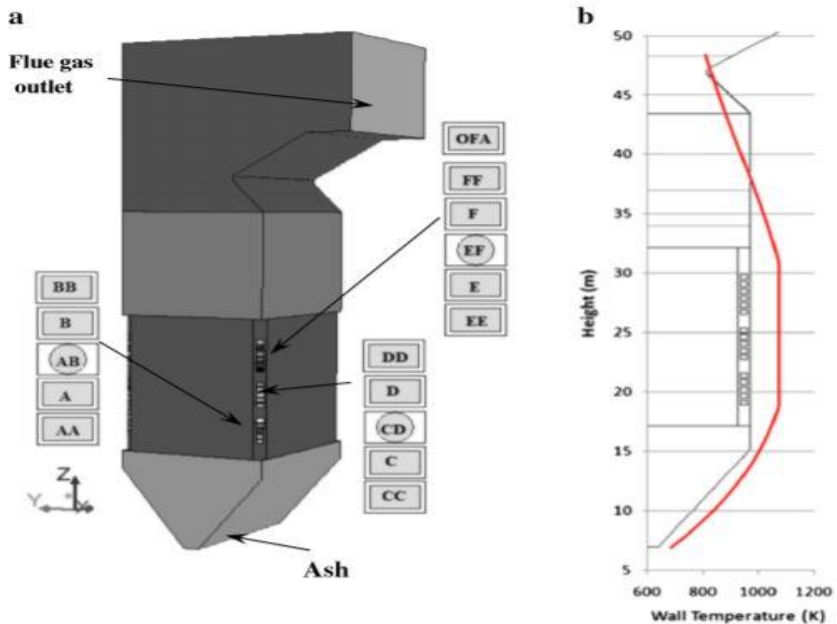
Dalam gambar 2.14 Fraksi massa gas buang untuk karbon monoksida, karbon dioksida dan oksigen dibandingkan untuk semua campuran bahan bakar. Berbeda dengan pembakaran batubara murni, campuran bahan bakar kasus 3 telah menurunkan konsentrasi karbon monoksida dan zona yang lebih sempit di saluran masuk ruang bakar. Selain itu, fraksi karbon monoksida berkisar pada daerah yang lebih panjang dari ruang pembakaran sampai dikonversi sepenuhnya menjadi CO_2 pada ketinggian sekitar 2,2 m di ketinggian tungku.

Hasil dari penelitian ini yang mengamati perilaku pembakaran dari tiga campuran bahan bakar, termasuk batubara murni, batubara dengan serbuk gergaji 9.14% (basis termal) dan batubara dengan serbuk gergaji 17.04 % dengan simulasi numerik. Serta menguji perilaku devolitisasi komponen biomassa : hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Menurut hasil, serbuk gergaji dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam sistem pembakaran. Namun, yang harus diperhatikan untuk campuran bahan bakar serbuk gergaji 17.04%, komponen lignin tidak sepenuhnya terurai dalam simulasi, karena laju reaksi pirolisis yang lebih rendah dan partikel biomassa yang lebih kasar. Selain itu, suhu pembakaran menurun dengan meningkatnya jumlah biomassa.

2.7. 2 Penelitian S.R. Gubba

Numerical modelling of the co-firing of pulverised coal and straw in a 300 Mwe tangentially fired boiler

Penelitian ini dilakukan oleh S.R. Gubba, D.B. Ingham, K.J. Larsen, L.Ma, M. Pourkashanian, H.Z. Tan, A. Williams dan H. Zhou. Tes pembakaran bersama biomassa dilakukan dalam 300 MW_e secara tangensial pada pembangkit listrik Baoji, China. Tungku adalah tipe *bottom* tersuspensi dan memiliki panjang penampang persegi panjang 14 x 15 m dan ketinggian 55 m. Penelitian ini menggunakan biomassa berupa jerami gandum dengan beban yang berbeda yaitu 6 % dan 12 %. Jerami gandum disuntikkan secara terpisah menggunakan pembakar khusus F di bagian atas dan bercampur dengan partikel batubara yang terbakar setelah masuk ke *boiler*. Pengukuran suhu diamati pada tiga lokasi ketinggian yang berbeda yaitu, 34, 37 dan 48,3 m. Sedangkan, pengukuran NO_x diambil dengan sampling dan menggunakan *Testo 350 Analyzer*.



Gambar 2. 15 (a) diagram skematis dari domain tungku. (b) profil suhu dinding yang digunakan dalam simulasi CFD sebagai fungsi dari ketinggian tungku

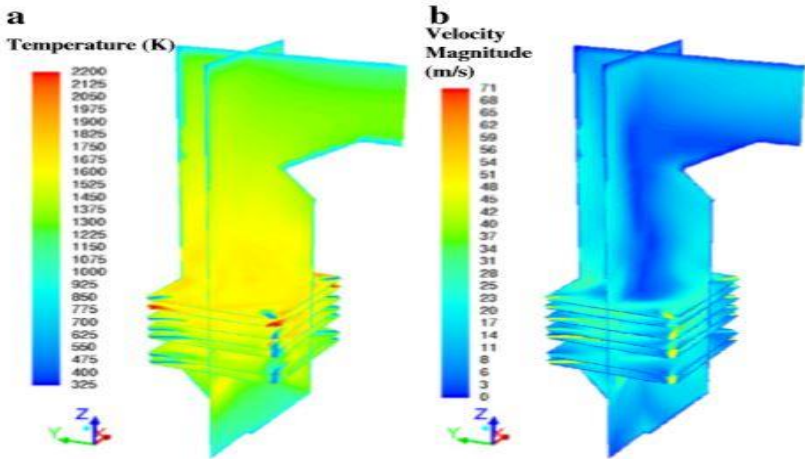
Tabel 2. 5 Properti batubara dan biomasa

	Huating coal [20]	Wheat straw[20]
Inherent moisture (%ar)	18.5	12.6
Ash (%ar)	17.6	28.3
VM (%daf)	35.5	79.3
C (%ar)	79.5	60.3
H (%ar)	4.6	3.0
O(%ar) ^a	15.1	34.1
N (%ar)	0.8	2.6
LCV MJ/kg (ar)	18.7	12.2

Tabel 2. 6 Rasio apek pada partikel jerami 6%

Aspect ratio	% of volume contribution
1.0	3.5
1.5	24.8
2.0	15.1
2.5	12.6
3.0	44.0

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menerapkan model pemanasan partikel biomassa yang sebelumnya dikembangkan dan divalidasi dalam laboratorium hingga pada tungku industri pembakaran batubara dan jerami gandum. Selain itu, semua partikel biomassa dianggap salah satu dari keduanya bola atau silinder tergantung pada rasio pada table 2.12. Gambar 2.16 (a) dan (b) menyajikan kontur suhu dan besaran kecepatan masing masing di tungku berbahan bakar sudut vertikal dan horizontal untuk pemuatan biomassa 6%. Dari gambar 2.16 (a) bahwa bidang suhu yang ditampilkan adalah seperti yang diharapkan, area dekat burner dan pusat menunjukkan suhu yang relatif tinggi karena pelepasan dan pembakaran batubara dan biomassa. Ini terbukti dari bidang masuk biomassa F bahwa daerah dekat burner lebih panas dibandingkan dengan inlet primer lainnya. Pada gambar 2.16 (b) menunjukkan bahwa daerah kecepatan tinggi dekat dengan inlet, sedangkan sisanya domain, termasuk outlet gas buang menunjukkan daerah dengan kecepatan rendah.



Gambar 2. 16 (a) Kontur temperatur. (b) Kontur kecepatan

Tabel 2. 7 Perbandingan data eksperimental dan presiksi numerik pada beban termal 6% dan 12%

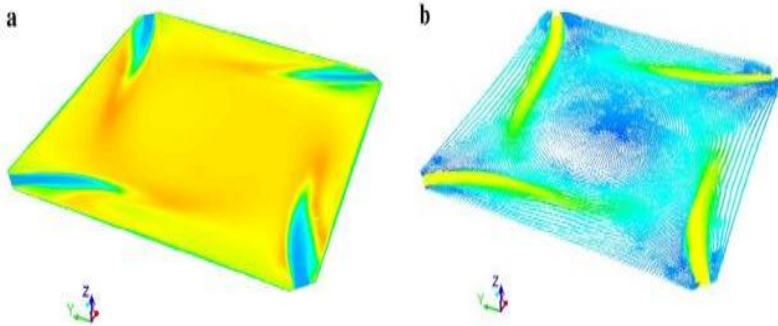
Table 4

Comparison of the experimental data and the numerical predictions at the thermal loadings of 6% and 12%.

	Furnace height (m)	Biomass loading 6%			Biomass loading 12%		
		Exp [20]	Calc [34]	Calc IHT	Exp [20]	Calc [34]	Calc IHT
Temperature (K)	34.0	1593 ± 25	1515	1620	1598 ± 25	1530	1625
	37.0	1551 ± 25	1470	1575	1559 ± 25	1485	1583
	48.3	1378 ± 25	1325	1353	1381 ± 25	1340	1413
Excess oxygen (dry, volumetric, %)		4.1	3.6	4.0	3.	3.2	3.8
Unburnt carbon in ash (mass; %)		0.47	0.0	1.0	0.52	0.0	1.1
NO _x (dry, ppm)		222	189	224	214	185	215

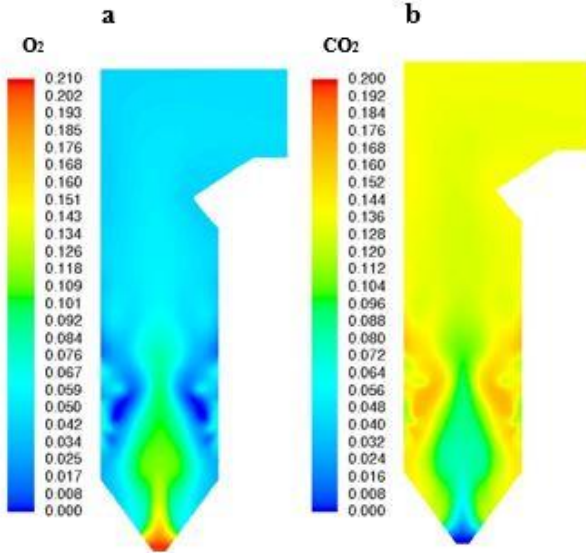
Gambar 2.17 (a) dan (b) menyajikan suhu dan kecepatan pada bidang inlet, menunjukkan rotasi bola api. Perhitungan menggunakan pemuatan biomassa yang lebih tinggi menunjukkan bahwa posisi dan peletakan bola api ke atas inlet hampir sama dan tidak ada perbedaan yang signifikan antara kedua pemuatan biomassa. Seperti pada tabel 2.7 Pada ketinggian 34 m, suhu sekitar

1620 K dan 1625 K untuk masing masing pemuatan 6% dan 12 % biomassa. Meskipun kenaikan suhu ini tidak signifikan, itu terbukti bahwa suhu gas meningkat dengan meningkatnya pemuatan biomassa.

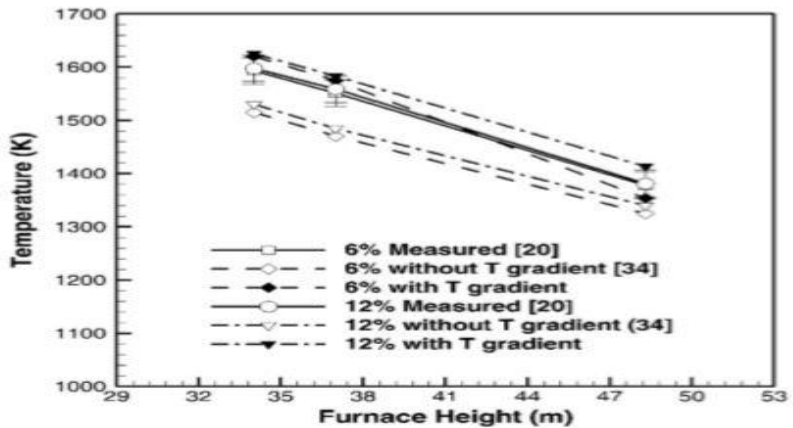


Gambar 2. 17 (a) fireball untuk kontur temperatur. (b) fireball untuk kontur kecepatan

Gambar 2.18 (a) dan (b) menyajikan distribusi O_2 dan CO_2 dalam fraksi mol pada bidang YZ. Dari gambar 2.18 (a) konsentrasi O_2 relatif lebih tinggi di bagian bawah dibandingkan pada bagian tengah. Pada gambar 2.18 (b) konsentrasi CO_2 yang dihasilkan relatif rendah pada bagian bawah. Perlu untuk diketahui pula, pembakaran jerami gandum dimulai dan berakhir lebih awal dibandingkan dengan batubara dan ini disebabkan oleh pertimbangan partikel silinder dalam penelitian ini.

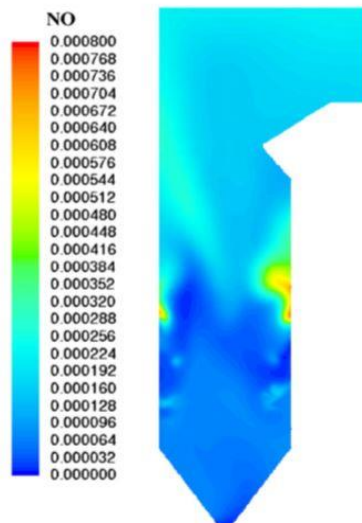


Gambar 2. 18 Kontur fraksi mol dari (a) O_2 . (b) CO_2 .

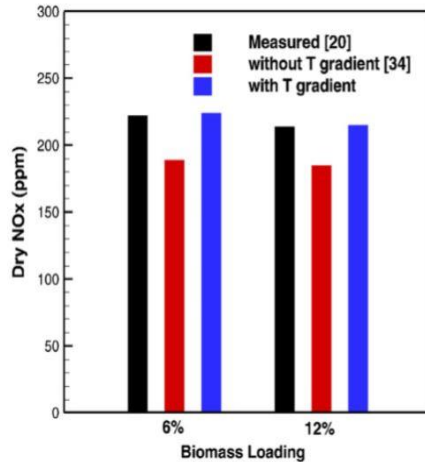


Gambar 2. 19 Perbandingan suhu pada 6 % dan 12 % dalam kondisi pemuatan biomassa termal

Lebih lanjut, emisi NO_x menjadi perhatian lebih untuk pembangkit listrik gambar 2.20 Menyajikan perkiraan distribusi NO pada bidang YZ pada tengah tungku. Konsentrasi NO di wilayah dekat dengan inlet biomassa relatif tinggi dibandingkan dengan daerah dekat inlet batubara, ini disebabkan karena tingginya suhu yang dihasilkan oleh pelepasan biomassa dalam pembakaran. Gambar 2.21 Menunjukkan perbandingan dari NO_x yang diukur untuk kedua muatan biomassa yang di teliti, yaitu 6% dan 12%. Dengan peningkatan pemuatan biomassa dari 6% hingga 12%, emisi NO_x berkurang sekitar 5% dan 11% dibandingkan dengan 100% pembakaran batubara murni.



Gambar 2. 20 Kontur fraksi mol NO



Gambar 2. 21 Perbandingan NO_x untuk dua kondisi pemuatan massa

Pembakaran bersama batubara dan jerami gandum pada pemuatan biomassa, yaitu 6% dan 12% dalam 300 MW_e tungku bahan bakar tangensial telah dimodelkan dengan sukses. Hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan yang signifikan jika dibandingkan dengan data pengukuran. Secara khusus, suhu pada berbagai ketinggian tungku sesuai dengan data pengukuran dan mengikuti tren input panas berdasarkan beban biomassa yang digunakan. Demikian pula, asumsi udara masuk yang digunakan dalam penelitian ini telah membantu peningkatan kelebihan oksigen dalam gas keluar yang sesuai dengan data percobaan. Hasil NO_x untuk kedua pemuatan biomassa yang diamati sesuai dengan data pengukuran, sehingga menunjukkan pengurangan NO_x dengan pembakaran biomassa secara bersamaan. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa model transfer panas internal yang dikembangkan untuk partikel biomassa berhasil diterapkan untuk mensimulasikan tungku pembakaran nyata dengan berbagai beban biomassa. Selain itu, simulasi ini telah membuktikan bahwa perawatan yang benar dari perpindahan panas internal dalam partikel biomassa penting untuk hasil yang akurat.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Adapun tahapan yang dilakukan dalam melakukan simulasi *Ansys Fluent* adalah sebagai berikut:

1. Studi Kasus

Permasalahan yang terjadi adalah bagaimana agar dapat mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan oleh pembangkit, melalui teknologi *Co-firing* tanpa harus mengubah siklus air dan uap pada pembangkit yang telah beroperasi, dan mengetahui pengaruhnya terhadap proses pembakaran di ruang bakar.

2. Studi Literatur

Untuk membantu memahami dan menganalisa masalah yang ada maka dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan proses pembakaran, operasi PLTU dan CFD. Studi literatur diperoleh dari jurnal, e-book, tugas akhir, handbook maupun website.

3. Pengumpulan Data

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

4. Pemodelan dan Simulasi

Tahapan ini diawali dengan *pre-processing* pembuatan geometri dan penentuan domain dari sistem pembakaran didalam *boiler*. Pada tahap *processing* dan *post-processing* dilakukan dengan perangkat lunak CFD komersial.

5. Analisa dan Pengolahan Data Hasil Simulasi

Pada akhir simulasi ditampilkan *post-processing* dengan menampilkan hasil simulasi secara kuantitatif dan kualitatif seperti distribusi temperature, pathline distribusi kecepatan, kandungan C, CO₂, CO dan O₂. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk

menganalisa pengaruh variasi presentase penambahan biomassa terhadap proses pembakaran yang terjadi dalam ruang bakar.

6. Penulisan Laporan

Semua hasil simulasi dengan menggunakan *Software Ansys Fluent* dan *Cycle Tempo* serta analisisnya dituangkan dalam sebuah laporan yang disusun secara sistematis dan mengacu pada panduan Tugas Akhir di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

3. 1 Pemodelan dan Simulasi dengan Software Ansys Fluent

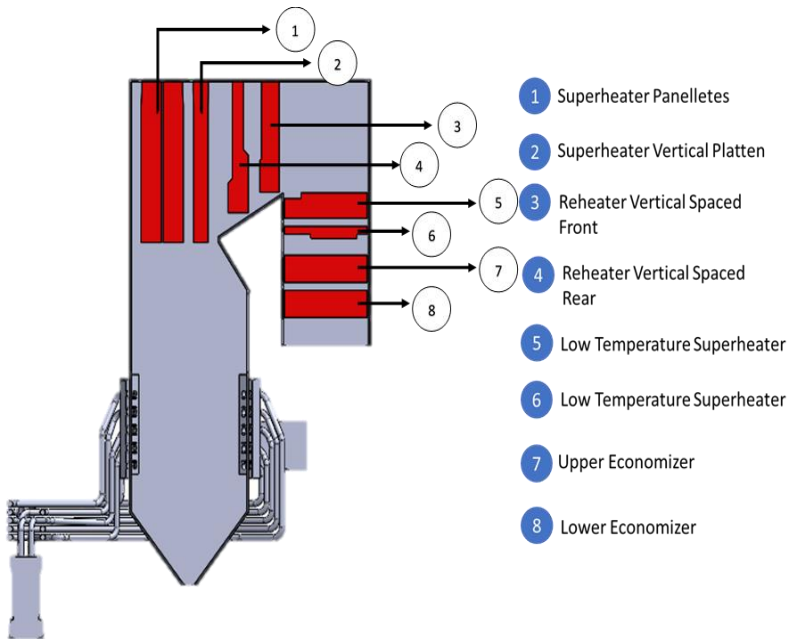
Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak CFD komersial. Tahap utama pemodelan dan simulasi ini ada 3, yaitu *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*. Penjelasan masing-masing tahapan akan dijelaskan pada anak sub-bab berikut:

3.2. 1 Pre-processing

Pre-processing merupakan tahap awal dari simulasi numerik. Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan sebagai berikut:

1. Pembuatan Geometri *Boiler*

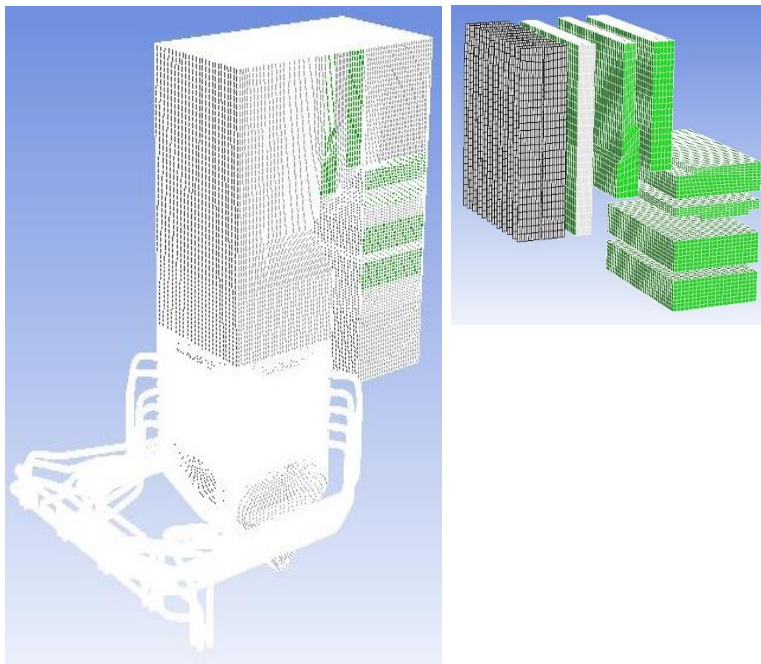
Boiler yang dimodelkan pada penelitian ini merupakan boiler tangensial. Di dalam *furnace* terdapat *water wall* dan beberapa *heat exchanger*. Bahan bakar untuk penyalaan awal menggunakan *high speed diesel* (HSD) yang diinjeksikan pada 3 level dengan masing-masing level terdiri dari 4 oil gun. Setelah pembebanan mencapai 25% dari pembebanan maksimum batubara mulai diumpangkan menggantikan HSD. Batubara akan diumpangkan melalui 5 level, setiap levelnya terdiri dari 4 coal burner yang ada pada setiap *corner* pada *furnace*.



Gambar 3. 1 Boiler tampak samping

2. Meshing

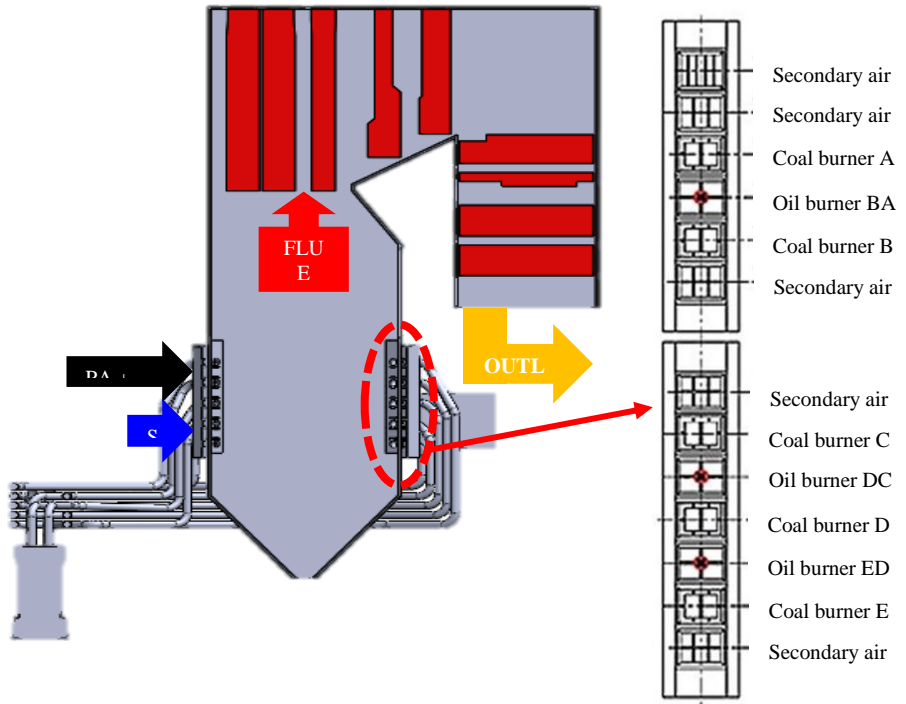
Meshing adalah proses pemecahan domain menjadi volume yang lebih kecil. Hal ini dilakukan untuk memudahkan diskritisasi domain aliran dan menerapkan persamaan pengendali pada domain aliran. Untuk mendapatkan simulasi yang akurat maka pemilihan *meshing* pada sebuah geometri dibuat mengikuti prediksi perubahan pola aliran yang terjadi.



Gambar 3. 2 Meshing boiler

3. Penentuan Domain Pemodelan

Pembuatan domain pemodelan terdiri dari *mass flow inlet* untuk *primary & secondary air nozzle*, *Over Fire Air (OFA)*, dan *coal injection*. Sedangkan untuk *heat exchanger* akan dimodelkan sebagai *porous media* yang sebelumnya telah dibuat menjadi potongan volume sesuai pembagian *heat exchanger*.



Gambar 3. 3 Domain pemodelan

3.2. 2 Processing

Processing merupakan proses pengaturan pada *perangkat lunak CFD komersial* untuk mensimulasikan proses pembakaran yang terjadi pada *boiler*. Berikut ini beberapa pengaturan pada *perangkat lunak CFD komersial* yang akan digunakan pada penelitian ini:

1. *Models*

Model yang digunakan pada penelitian ini diuraikan pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Model yang digunakan pada simulasi numerik
Perangkat lunak CFD komersial

Model	Keterangan	Dasar Pemikiran
Multiphase	Off	Penelitian dilakukan pada Flue gas Yang terjadi akibat pembakaran
Energy Equation	On	Mencakup perpindahan panas konveksi dan radiasi
Viscous	Standart K- ϵ	Dapat menyelesaikan permasalahan heating, bouyancy, compressibility, dan combustion.
Radiation	Off	Tidak diperlukan
Heat Exchanger	Off	Heat exchanger dimodelkan sebagai porous medium pada cell zone condition dengan penyerapan heat generation
Species	Non-premixed Combustion	Pembakaran yang terjadi antara dua bahan bakar yaitu batubara dan biomassa
Dicrete Phase	On	Mendefinisikan injeksi untuk inlet batubara dan biomassa
Solidification	Off	Tidak diperlukan
Acoustic	Off	Tidak diperlukan
Eulerian Wall Film	Off	Tidak diperlukan

2. Injeksi

Pengumpanan bahan bakar batubara ke dalam boiler dilakukan dengan penginjeksian batubara melalui coal burner yang terdapat pada masing-masing corner. Terdapat 5 elevasi coal burner pada PLTU Paiton, elevasi A sampai dengan E. Masing-masing elevasi terdiri dari 4 burner.

Batubara diinjeksikan dengan sudut *tilting* 0° (sejajar dengan sumbu horisontal). Sedangkan untuk *secondary air* dan OFA masing-masing memiliki pengaturan sudut sesuai dengan *setting* pada kondisi aktual *boiler* tersebut. Pada penelitian ini akan dilakukan penginjeksian batubara dan biomassa . Ketentuan penginjeksian batubara dapat dilihat dalam tabel 3.2 dibawah.

Tabel 3. 2 Ketentuan injeksi batubara dan biomassa pada masing-masing corner

Setting	Corner Coal Injection	Dasar pemikiran
Injection Type	Surface	Pendistribusian batubara saat memasuki Furnace terjadi pada sisi tiap mill
Particle Type	Combusting	Reaksi yang terjadi pada partikel yang diinjeksikan merupakan reaksi pembakaran
Material	Coal Biomassa	Data performance test PLTU Paiton
Diameter Distibution	Rosin Rammler	Distribusi diameter partikel batubara tidak memiliki nilai yang tetap

3. Material

Jenis material yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *combusting particle*. Untuk properties dari *combusting particle* yang digunakan, yaitu *batubara* akan dijelaskan tabel 3.3. Sedangkan untuk tabel 3.4 akan menjelaskan properties dari *combusting particle* yang terdiri dari *biomassa*.

Komposisi batubara yang diinjeksikan pada *furnace boiler* yaitu 100% batubara dan 95% batubara serta komposisi biomassa yang diinjeksikan pada *furnace boiler* yaitu 5 % biomassa.

Tabel 3. 3 Data Properties batubara

Fluent Combusting Particle	Batubara	Dasar Pemikiran
Density, Kg/m ³	1400	www.engineeringtoolbox.com
Cp, J/Kg.K	1680	www.engineeringtoolbox.com
Vaporation temperature, K	400	Fluent Database
Volatile Component Fraction, %	50.54333	Data Perusahaan
Binary Difusivity, m ² /s	0.00004	Data Perusahaan
Swelling Coefficient	1.4	Fluent Database
Burnout Stoichiometric	2.67	Data Perusahaan
Combustible Fraction, %	46.78183	Data Perusahaan
Devolatilization Model, 1/s	50	Fluent Database
Combustion Model	Diffusion-limited	Data Perusahaan

Tabel 3. 4 Data Properties Biomassa

ULTIMATE ANALYSIS	
DATA	NILAI
C	33.22 %
H	3.84 %
O	27.04 %
N	1.00 %
S	0.07 %
HHV	3217 kkal/kg
PROXIMATE ANALYSIS	
DATA	NILAI
FIXED CARBON	12.58 %
VOLATILE MATTER	52.56 %
ASH	4.06 %
MOISTURE	30.78 %

4. *Operating Condition*

Operating condition merupakan perkiraan tekanan pada daerah operasi *boiler* yaitu 101325 Pa.

5. *Cell Zone Condition*

Cell Zone Condition digunakan untuk menentukan aliran dan variable *heat exchanger* pada *boiler*, yaitu *Reheater 1*, *Reheater 2*, *SH 1*, *SH 2*, *SH 3*, *ITSH 1*, *ITSH 2*, *Economizer 1*, dan *Economizer 2* yang dimodelkan sebagai *porous media*. Pengaturan *heat exchanger* ditunjukkan pada tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3. 5 Pengaturan Heat Exchanger pada boiler

Heat Exchanger	Rotation-axis Direction			Energy W/m ³
	Arah X	Arah Y	Arah Z	
Reheater 1	0	0	0	-527042.4
Reheater 2	0	0	0	-527042.4
SH 1	0	0	0	-161928
SH 2	0	0	0	-161928
SH 3	0	0	0	-161928
LTSH 1	0	0	0	-161928
LTSH 2	0	0	0	-161928
Economizer 1	0	0	0	-119125
Economizer 2	0	0	0	-119125

6.. Boundary Condition

Boundary Condition adalah batasan nilai dan kondisi yang harus diberikan pada domain aliran agar simulasi sesuai dengan fenomena fisik yang terjadi. Dalam penelitian ini domain *heat exchanger* dimodelkan sebagai *porous medium* yang memiliki nilai yang didapat dari proses perhitungan, sedangkan *waterwall-tube* memiliki *heat flux*. Karena *heat exchanger* menyerap panas dari *flue gas*, maka data yang dimasukkan diberi tanda minus didepan nilai tersebut. Penginjeksian batubara disesuaikan dengan kondisi aktual dengan menginputkan data *mass flow rate* pada masing-masing elevasi *oil gas*, *inlet secondary air mill (A-E)*, *Outlet boiler*, *Sa top Bottomdan Over Fire Air (OFA)*. Untuk wall convection dan wall radiation dimodelkan sebagai wall yang memiliki nilai Heat Flux yaitu -175558 W/m^2 .

Data *mill* yang dimasukkan pada *boundary condition* ditunjukkan dalam tabel 3.5 dibawah ini. *mill A, B, C, D, dan E*. Untuk tabel 3.6 menunjukkan pengaturan parameter *boundary*

condition pada *secondary air* OFA; tabel 3.7 untuk menunjukkan parameter Boundary Condition pada outlet boiler; tabel 3.8 untuk menunjukkan parameter Boundary Condition pada inlet Secondary air; tabel 3.9 untuk menunjukkan parameter Boundary Condition pada Sa Top bottom; tabel 3.10 untuk menunjukkan parameter Boundary Condition pada oil gas.

Tabel 3. 5 Boundary condition untuk mill

Mill	Temperatur outlet (°C)	Mass Flow Rate (Kg/s)	Velocity Magnitude (m/s)
A	52.01	13.16611	21.79
B	53.55	13.78972	21.67
C	52.2	12.92028	24.61
D	54.32	13.78333	22.2
E	52.01	13.0725	21.72

Tabel 3. 6 Pengaturan parameter untuk OFA

Momentum	
Mass Flow Spesification Method	Mass Flow Rate
Direction Spesification Method	Normal to boundary
Turbulence	
Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent intensity (%)	5
Turbulent Viscosity Ratio	10

Tabel 3. 7 Pengaturan parameter untuk Outlet boiler

Momentum	
Mass Flow Method	Spesification Mass Flow Rate
Direction Method	Spesification Normal to boundary
Turbulence	
Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent intensity (%)	5
Turbulent Viscosity Ratio	10

Tabel 3. 8 Pengaturan parameter untuk inlet secondary air

Momentum	
Mass Flow Method	Spesification Mass Flow Rate
Direction Method	Spesification Normal to boundary
Turbulence	
Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent intensity (%)	5
Turbulent Viscosity Ratio	10

Tabel 3. 9 Pengaturan parameter untuk inlet Secondary air Top bottom

Momentum	
Mass Flow Method	Spesification Mass Flow Rate
Direction Method	Spesification Normal to boundary
Turbulence	
Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent intensity (%)	5
Turbulent Viscosity Ratio	10

Tabel 3. 10 Pengaturan parameter untuk oil gas

Momentum	
Mass Flow Spesification Method	Mass Flow Rate
Direction Spesification Method	Normal to boundary
Turbulence	
Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent intensity (%)	5
Turbulent Viscosity Ratio	10

7. *Solution*

Solusi pada penelitian ini menggunakan algoritma SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) yaitu *least squares cell based* untuk *gradient*, *second order* untuk *pressure*, *second order upwind* untuk *momentum*, serta *first order upwind* untuk *turbulent kinetic energy* dan *turbulent dissipation rate*.

a. *Initialize*

Initialize merupakan tebakan awal sebelum melakukan perhitungan sehingga akan memudahkan dalam mencapai konvergen. Tebakan dapat dimulai dari kondisi batas sisi masuk, sisi keluar, semua zona dan lain-lain. *Initialize* yang digunakan adalah *hybrid initialization*.

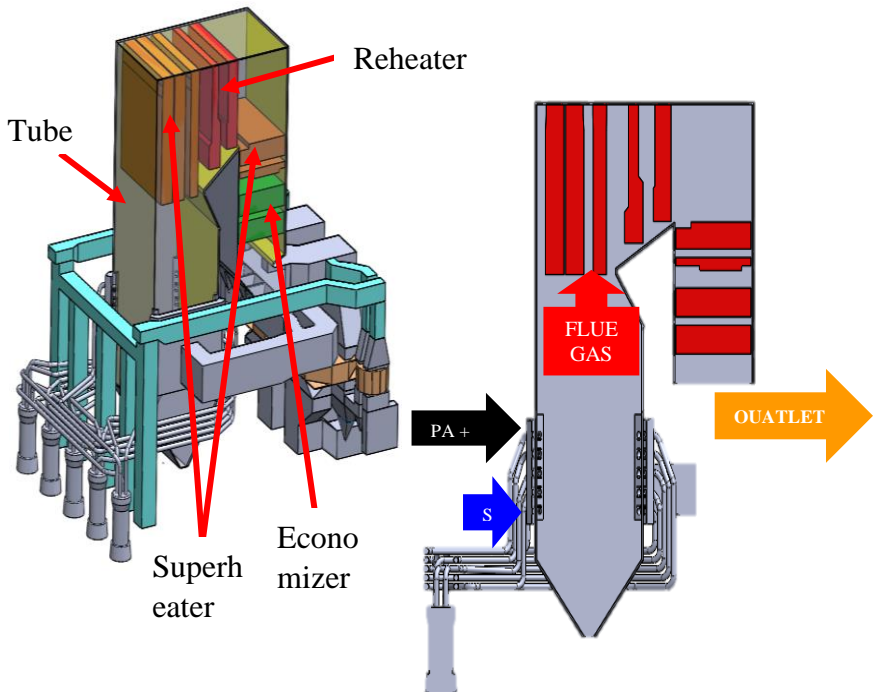
b. *Monitoring Residual*

Monitor 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 (Sa'adiyah, 2013).

3.2. 3 Post-processing

Merupakan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif (kontur maupun vektor) dan data kuantitatif berupa grafik maupun tabel data. Pada penelitian ini penganalisaan dilakukan terhadap distribusi temperatur (kontur dan grafik), distribusi kecepatan (kontur dan grafik), dan distribusi gas buang C,CO,CO₂, dan O₂.

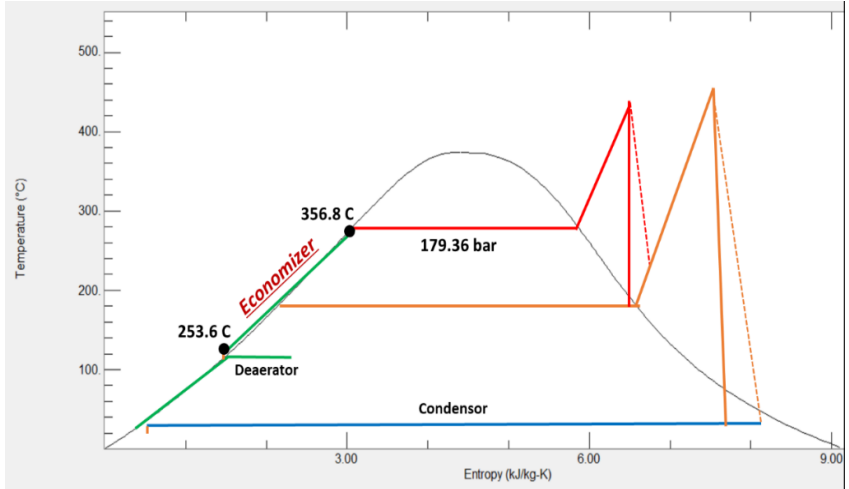
3. 2 Boundary Condition Penelitian



Gambar 3. 4 Boundary Condition Penelitian

Gambar 3.2 menunjukkan boundary yang digunakan pada simulasi. Pembebanan diberikan pada masing-masing heating part.

3.3.1 Beban Economizer



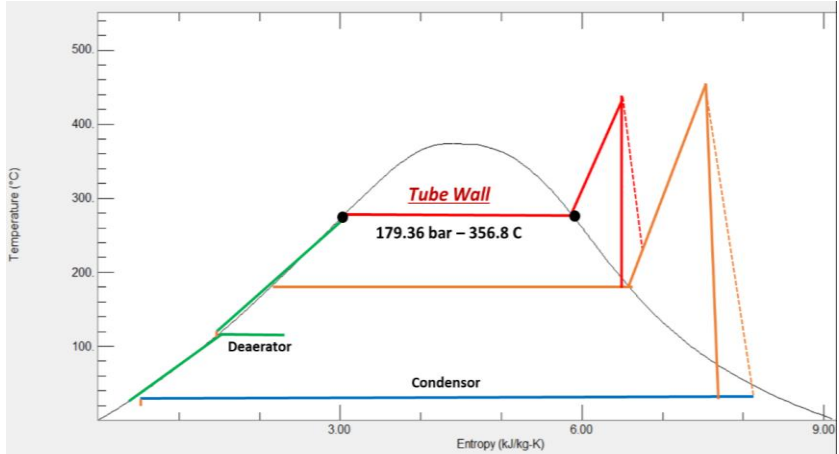
Gambar 3. 5 T-s diagram pada Economizer

Pembebanan dilakukan pada economizer berdasarkan data heat balance. T-s diagram proses pemanasan sisi dalam tube dapat dilihat pada gambar 3.5. Hasil pembebanan ditunjukkan pada tabel 3.11.

Tabel 3. 11 Pembebanan Economizer

Economizer		
Pres in	179.36	Bar abs
Temp in	253.6	deg C
Hin	1103	kJ/kg
Pres out	179.36	Bar abs
Temp out	356.8	deg C
Hout	1729	kJ/kg
Heat Duty	36,667.91	kW

3.3. 2 Beban Tube Wall



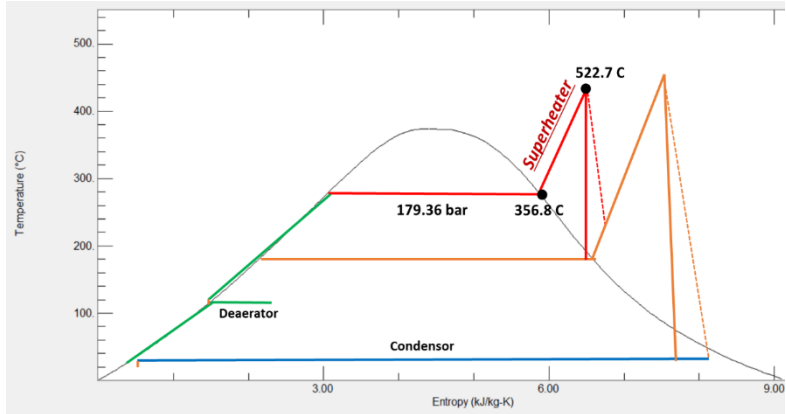
Gambar 3. 6 T-s diagram pada Tube wall

Pembebanan dilakukan pada tube wall berdasarkan data heat balance. T-s diagram proses evaporasi sisi dalam tube dapat dilihat pada gambar 3.6. Hasil pembebanan ditunjukkan pada tabel 3.12.

Tabel 3. 12 Pembebanan Tube wall

Tube Wall		
Pres in	179.36	Bar abs
Temp in	356.8	deg C
Hin	1729	kJ/kg
Pres out	179.36	Bar abs
Temp out	356.8	deg C
Hout	2512	kJ/kg
Heat Duty	278,207.08	kW

3.3.3 Beban Superheater



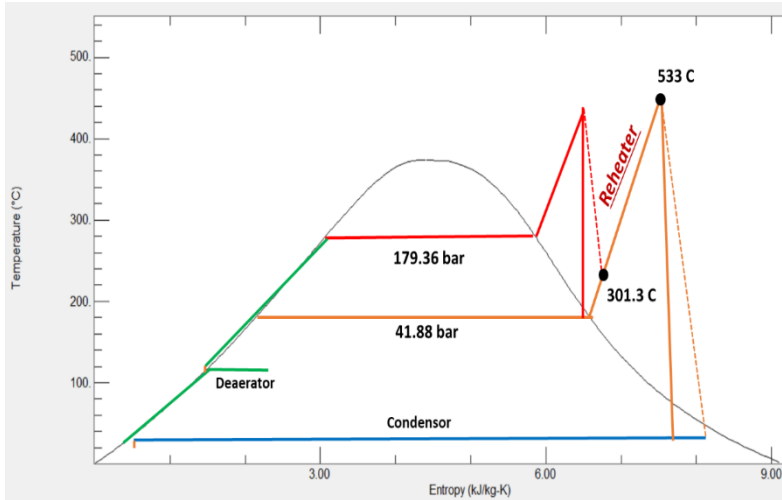
Gambar 3. 7 T-s diagram pada Superheater

Pembebanan dilakukan pada superheater berdasarkan data heat balance. T-s diagram proses pemanasan sisi dalam tube dapat dilihat pada gambar 3.7. Hasil pembebanan ditunjukkan pada tabel 3.13.

Tabel 3. 13 Pembebanan Superheater

SH		
Pres in	179.36	Bar abs
Temp in	356.8	deg C
Hin	2512	kJ/kg
Pres out	165.536	Bar abs
Temp out	522.7	deg C
Hout	3354	kJ/kg
Heat Duty	299,170.32	kW

3.3. 4 Beban Reheater



Gambar 3. 8 T-s diagram pada Reheater

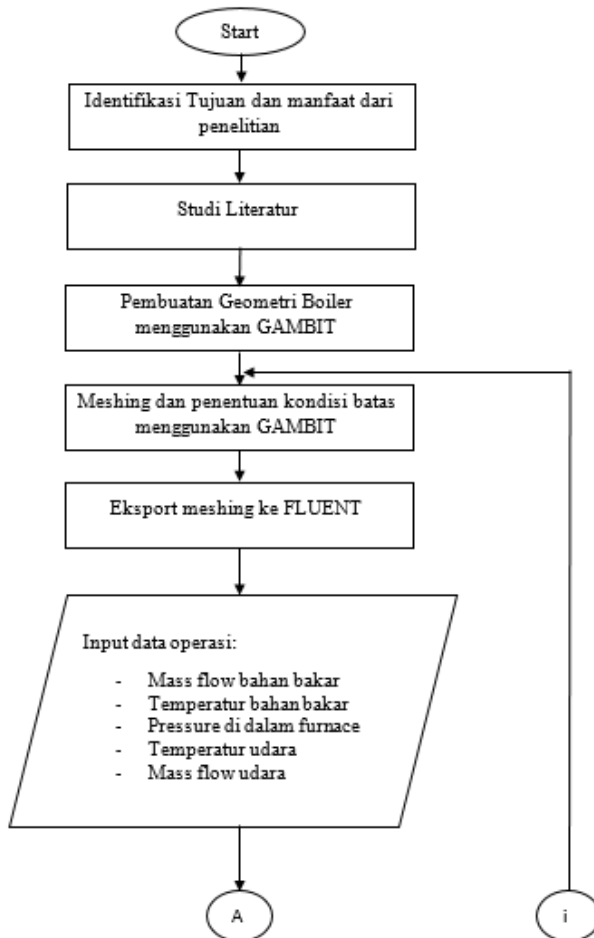
Pembebanan dilakukan pada superheater berdasarkan data heat balance. T-s diagram proses pemanasan sisi dalam tube dapat dilihat pada gambar 3.8. Hasil pembebanan ditunjukkan pada tabel 3.14.

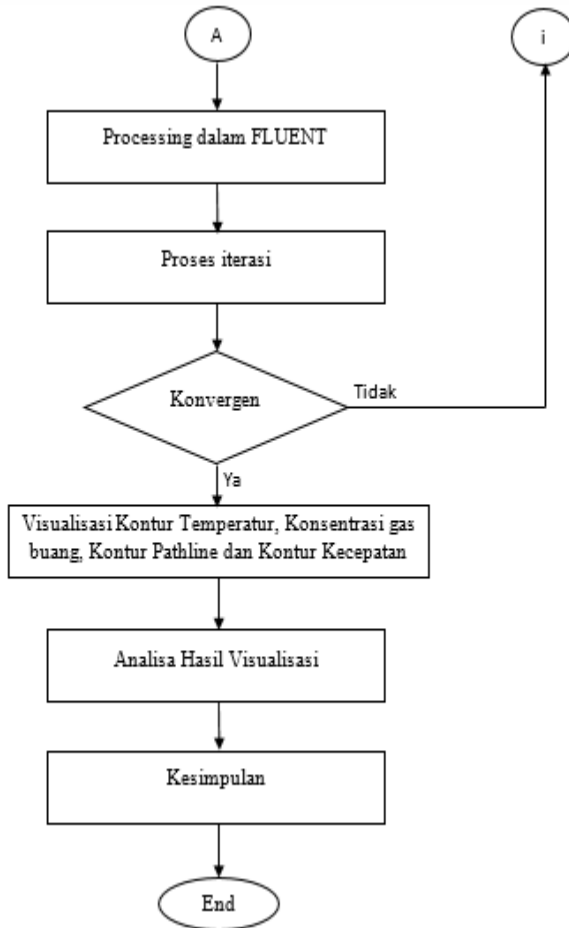
Tabel 3. 14 Pembebanan Reheater

RH		
Pres in	41.88	Bar abs
Temp in	301.3	deg C
Hin	2958	kJ/kg
Pres out	39.864	Bar abs
Temp out	533	deg C
Hout	3521	kJ/kg
Heat Duty	200,039.06	kW

3.3 Flowchart Penelitian

Berdasarkan uraian tahapan penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya, diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.2.





Gambar 3. 9 Flowchart Penelitian

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang validasi dari simulasi *boiler* PLTU Paiton dan analisa hasil simulasi numerik dari penelitian yang dilakukan. Adapun untuk data hasil simulasi numerik yang ditampilkan meliputi data kualitatif dan kuantitatif, yaitu kontur temperatur, kontur pathline dan kontur kecepatan serta kontur gas buang hasil pembakaran seperti gas C, CO₂, CO dan O₂.

4.1 Data Perhitungan

Data perhitungan yang digunakan merujuk dari data operasi PLTU Paiton unit 9 sebagai data untuk validasi hasil simulasi.

4.1.1 Perhitungan Panas yang Diserap Heat Exchanger

Perhitungan ini dilakukan untuk mencari nilai panas yang diserap jajaran *heat exchanger* dan *heat flux* pada *water wall tube*. Perhitungan dilakukan menggunakan analisa dari sisi *steam* dan *flue gas*. Hal ini dikarenakan sensor indikator temperatur yang terpasang didalam *furnace boiler* pada masing-masing *heat exchanger* berbeda. *Superheater* dan *reheater* menggunakan sensor temperatur pada sisi *steam*, sedangkan LTSH dan *economizer* menggunakan sensor temperatur pada sisi *flue gas*.

a. *Superheater Div Panel Front, Rear & Platen*

Perhitungan dilakukan menggunakan analisis *steam*.

Berikut adalah data *Superheater Div Panel Front, Rear & Platen*:

- $T_{in} = 253.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{out} = 356.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\dot{m}_{steam} = 355.3092 \text{ kg/s}$
- $C_{p_{steam}} = 1.0000051 \text{ kJ/kg.K}$
- Volume *SH Front* = 92.7635 m³
- Volume *SH Rear* = 92.7635 m³
- Volume *SH Platen* = 30.2645 m³
- Rasio volume *SH Front* : *SH Rear* : *SH Platen* = 0,41 : 0,41 : 0,18

Perpindahan panas (q) total yang terjadi pada *Superheater Div Panel Front, Rear & Platen* :

$$\begin{aligned} q &= \dot{m}_{steam} \times C_{p_{steam}} \times \Delta T \\ &= 355,3092 \frac{Kg}{s} \times 1.0000051 \frac{Kj}{Kg.K} \times (629,8 - 526,6) K \\ &= 36667,91 \text{ kW} \end{aligned}$$

Perpindahan panas pada *SH Front, Rear & Platen*:

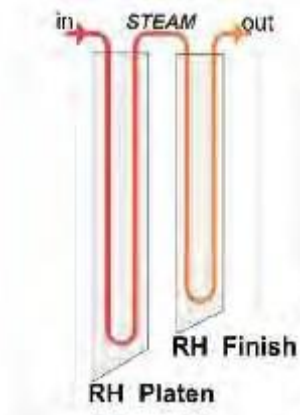
$$\begin{aligned} q_{SH \text{ Front}} &= 15033,8431 \text{ kW} \\ q_{SH \text{ Rear}} &= 15033,8431 \text{ kW} \\ q_{SH \text{ Platen}} &= 6600,2238 \text{ kW} \\ q''_{SH \text{ Front}} &= \frac{12517.5055 \text{ kW}}{92,7635 \text{ m}^3} = 134940 \frac{W}{m^3} \\ q''_{SH \text{ Rear}} &= \frac{12517.5055 \text{ kW}}{92,7635 \text{ m}^3} = 134940 \frac{W}{m^3} \\ q''_{SH \text{ Platen}} &= \frac{4083,8862 \text{ kW}}{30,2645 \text{ m}^3} = 134940 \frac{W}{m^3} \end{aligned}$$

b. Reheater Platen dan Reheater Finish

Perhitungan dilakukan menggunakan analisa *steam*.

Berikut adalah data *Reheater Platen dan Reheater Finish*:

- $T_{in} = 301.3 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $T_{out} = 533 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{steam} = 355.3092 \text{ kg/s}$
- $C_{p_{steam}} = 0.233925 \text{ kJ/kg.K}$
- Volume *RH Platen* = 218.6209 m
- Volume *RH Finish* = 236.8393 m
- Rasio volume = *RH Platen* : *RHF*
= 0,48 : 0,52



Gambar 4. 1 ilustrasi steam pada reheater

Perpindahan panas (q) total yang terjadi pada *Reheater Platen* dan *Reheater Finish*:

$$\begin{aligned} q &= \dot{m}_{\text{steam}} \times C_{p\text{steam}} \times \Delta T \\ &= 355.3092 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \times 0.233925 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg.K}} \times (706 - 574.3)\text{K} \\ &= 200039.06 \text{ kW} \end{aligned}$$

Perpindahan panas *Reheater Platen* dan *Reheater Finish*:

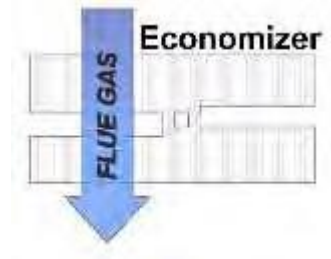
$$\begin{aligned} q_{RH \text{ Platen}} &= 96018.7488 \text{ kW} \\ q_{RH \text{ Finish}} &= 104020.3112 \text{ kW} \\ q''_{RH \text{ Platen}} &= \frac{96018.7488 \text{ kW}}{218.6209 \text{ m}^3} = 439202 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \\ q''_{RH \text{ Finish}} &= \frac{101020.3112 \text{ kW}}{236.8393 \text{ m}^3} = 439202 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

c. *Economizer*

Perhitungan dilakukan menggunakan analisa *flue gas*.

Berikut adalah data *Economizer*:

- $T_{\text{in}} = 253.6 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{\text{out}} = 356.8 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{\text{flue gas}} = 617.4992 \text{ kg/s}$
- $C_{p\text{flue gas}} = 1,7379 \text{ kJ/kg}$.
- $\text{Volume} = 769.5259 \text{ m}^3$



Gambar 4. 2 Ilustrasi aliran *steam* pada *Economizer*

Perpindahan panas (q) yang terjadi pada *Economizer*:

$$\begin{aligned} q &= \dot{m}_{\text{flue gas}} \times C_{p\text{flue gas}} \times \Delta T \\ &= 617.4992 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \times 1,7379 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg.K}} \times (629.8 - 526.6)\text{K} \\ &= 36667.91 \text{ kW} \\ q'' &= \frac{36667.91 \text{ kW}}{769.5259 \text{ m}^3} = 47650 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

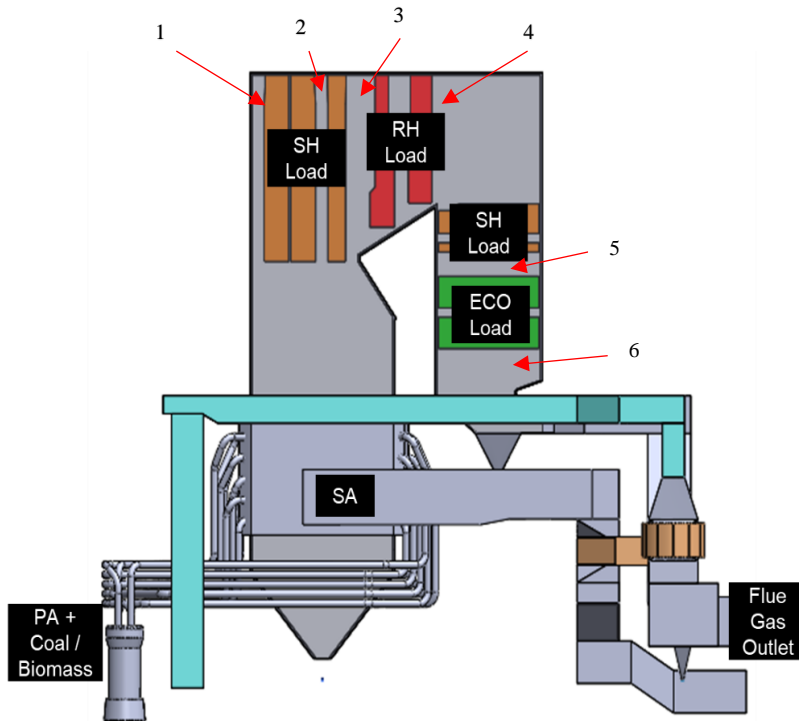
d. waterwall

Perhitungan panas yang diserap oleh waterwall adalah panas total yang diserap oleh boiler (Q_{abs}) dikurangi total panas yang diserap heat exchanger. Dengan asumsi luasan waterwall sama dengan luasan permukaan boiler 3169 m^2 , maka:

$$q'' = \frac{278207.08 \text{ kW}}{3169 \text{ m}^2} = 8779 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

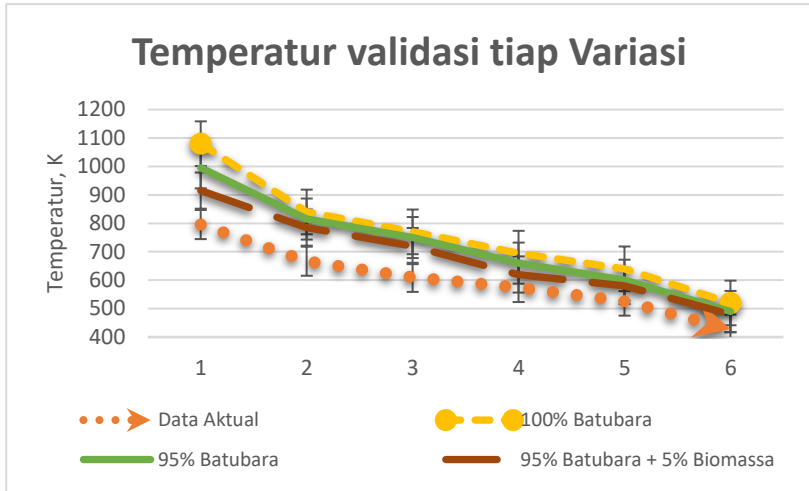
4. 2 Validasi

Sebelum dilakukan pengambilan data dan analisa hasil simulasi numerik terlebih dahulu akan dilakukan validasi. Validasi yang dimaksud adalah membandingkan data yang ada pada DCS (*Display Control System*) pada kondisi *performance test unit*, dengan data temperatur *inlet* dan *outlet* pada masing-masing jajaran *heat exchanger* dari hasil simulasi numerik (CFD). Untuk posisi pengambilan data temperatur ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut ini :



1. Before Super Heater
2. After Super Heater
3. Before ReHeater
4. After ReHeater
5. Before Economizer
6. After Economizer

Gambar 4. 3 Posisi pengambilan data temperatur pada boiler



Gambar 4. 4 Grafik perbandingan antara temperatur DCS dan temperatur hasil simulasi fluent

TEMPERATUR (°C)		1	2	3	4	5	6
Data Aktual		795,7	666,8	610	574,3	526,6	427,8
Hail Fluent	100 % batubara	1080	840	770	695	640	520
	95 % batubara	995	815	750	660	600	490
	95 % batubara + 5 % biomassa	915	785	720	620	580	480
Error %	100% batubara	0,263241	0,20619	0,207792	0,173669	0,177188	0,177308
	95% batubara	0,2003	0,18184	0,186667	0,129848	0,122333	0,126939
	95% batubara + 5% biomassa	0,130383	0,150573	0,152778	0,07371	0,092069	0,10875

Data temperatur rata-rata diperoleh dengan membuat *isosurface* pada simulasi numerik dengan posisi sesuai gambar diatas. Hasil temperatur rata-rata dari simulasi numerik kemudian dibandingkan dengan data temperatur di DCS dalam bentuk tabel dan di plotkan ke dalam grafik. Selain itu juga dihitung nilai *error* antara ketiga data tersebut. Pada gambar 4.2 menunjukkan grafik antara temperatur DCS dan simulasi numerik *fluent*. Tampak bahwa grafik mengalami penurunan temperatur mulai dari *superheater* (1) hingga keluar dari *economizer* (6). Hal ini terjadi dikarenakan panas yang berasal dari gas buang diserap saat melalui jajaran *heat exchanger* yang terdiri dari *superheater*, *reheater* dan *economizer*.

Dari grafik diatas, tampak bahwa hampir disemua titik validasi menunjukkan temperatur rata-rata yang mendekati sama dengan temperatur pada kondisi operasional yang ada pada DCS, dengan *error* $\pm 20\%$. Untuk variasi pertama, yaitu 100% batubara pada posisi titik 1 pengambilan data *superheater* merupakan nilai *error* terbesar yaitu 26%. Untuk variasi 95% batubara pada posisi titik 1 pengambilan data *superheater* merupakan nilai *error* terbesar yaitu 20%, sedangkan untuk variasi ketiga yaitu 95% batubara dengan 5% biomassa pada posisi titik 3 merupakan nilai *error* terbesar yaitu 15%.

4. 3 Analisa hasil simulasi numerik

Pada simulasi numerik ini akan dilakukan analisa untuk pengoperasian dengan penginjeksian batubara dan biomassa dengan konfigurasi sesuai aktual dan dalam 3 (tiga) variasi komposisi yaitu 100% batubara, 95% batubara dan 5% batubara dengan 5% biomassa. Kondisi pertama, sesuai kondisi aktual yaitu tanpa penambahan biomassa. Kemudian untuk kondisi kedua, dilakukan pengurangan batubara sebanyak 5% pada elevasi E dan kondisi ketiga dengan batubara sebanyak 95% dan penambahan sebanyak 5% biomassa pada elevasi E. Posisi pengamatan diambil

pada z =center dan masing-masing elevasi coal burner. Sedangkan untuk pengambilan data hasil simulasi dilakukan secara kualitatif berupa visualisasi dan data kuantitatif berupa tabel ataupun grafik.

4.3. 1 Distribusi temperatur

Tangentially fired boiler terdiri dari *furnace* dan jajaran *heat exchanger* atau biasa disebut *backpass boiler*. Pada bagian *furnace* terdapat elevasi *coal burner* yang di injeksikan bahan bakar dan udara pembakaran sehingga proses pembakaran terjadi. Dari proses pembakaran tersebut dihasilkan gas buang yang memiliki temperatur tinggi dan digunakan untuk memanaskan *fluida* yang dialirkan pada *heat exchanger*.

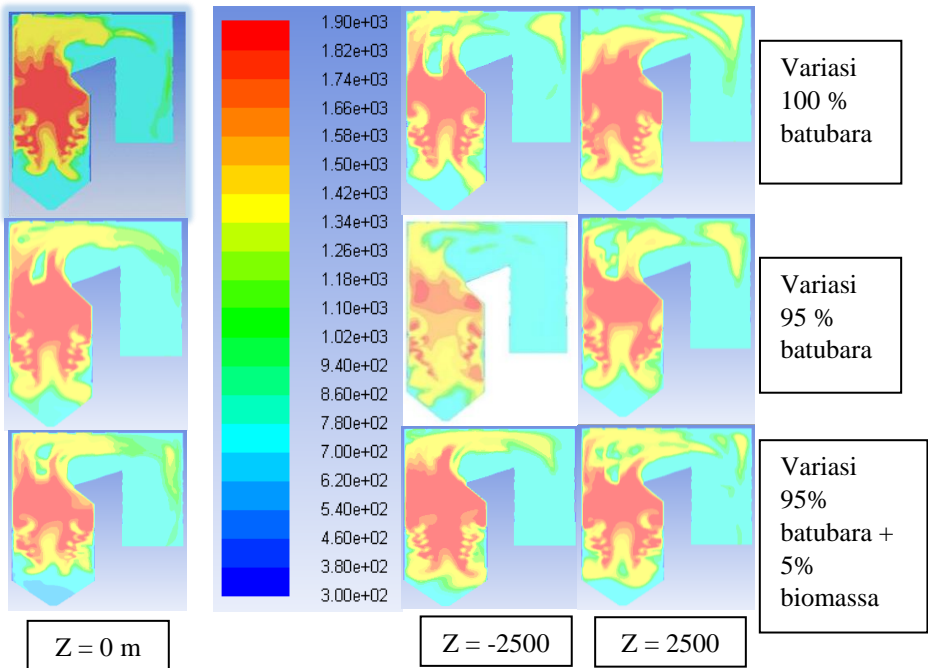
Pengambilan data temperatur dilakukan dengan membuat *isosurface* pada elevasi dimana bahan bakar dan udara pembakaran diinjeksikan, untuk mengetahui distribusi temperatur penampang horizontal pada elevasi tertentu. Selain itu untuk mengetahui distribusi temperatur pada penampang vertikal, maka juga dibuat *isosurface* pada *center boiler*.

4.3.1. 1 Distribusi temperatur pada z =center

Untuk mengetahui sebaran temperatur yang terjadi saat dimulai pembakaran pada daerah *furnace* sampai dengan *flue gas* keluar dari *boiler*, maka dilakukan pengamatan temperatur setiap elevasi *burner boiler* untuk detail pengamatan dengan variasi komposisi flow bahan bakar pada penelitian yang dilakukan.

Dari *post processing* hasil simulasi numerik didapatkan data kualitatif berupa kontur temperatur. Pada gambar 4.5 (a) menunjukkan distribusi temperatur pada bagian tengah *boiler* untuk ketiga kondisi penelitian, dimulai dari *bottom furnace* sampai dengan *outlet boiler*. Pada daerah *furnace* secara keseluruhan berwarna merah sementara pada daerah jajaran *heat exchanger* berwarna kuning, yang artinya bahwa temperatur pada *furnace* lebih tinggi dibandingkan pada bagian jajaran *heat*

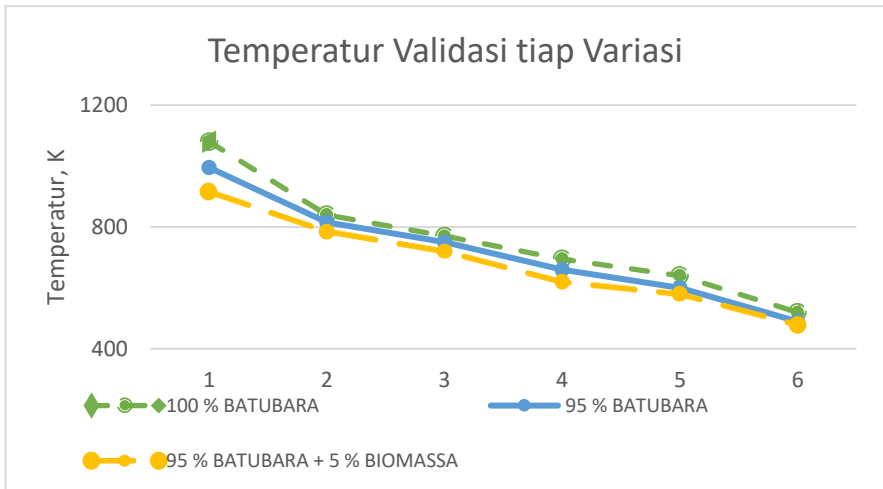
exchanger. Saat *flue gas* (gas buang) memasuki jajaran *heat exchanger*, temperaturnya mengalami penurunan sampai dengan *outlet boiler*. Pada daerah *furnace boiler*, bahan bakar dan udara bakar diinjeksikan dari ujung-ujung *furnace* ke arah pusat *furnace*. Batubara memiliki energi pada ikatan antara unsur-unsur pembentuknya, seperti karbon, oksigen, hidrogen, nitrogen dan sulfur.



Gambar 4. 5 Posisi pengamatan distribusi temperatur pada $z=\text{center}$

Dengan adanya reaksi kimia antara batubara dan udara pembakaran akan menghasilkan gas buang dengan temperatur yang tinggi. Gas buang dengan temperatur tinggi itulah yang digunakan untuk memanasi uap yang mengalir di dalam jajaran *heat exchanger*.

Sedangkan pada gambar 4.5 (b), menunjukkan distribusi temperatur pada penampang vertikal ($z=center$) untuk 2 (dua) elevasi simulasi, yaitu axial coordinate -2500 mm dan axial coordinate 2500 mm. Pada kedua kontur temperatur diatas, secara keseluruhan hampir sama, dimana temperatur di daerah tengah *furnace* lebih tinggi dibandingkan sisi-sisi *furnace*. Untuk elevasi -2500 mm temperatur yang dihasilkan lebih rendah dan merata dilihat dari kontur berwarna kuning yang telah tampak mulai dari elevasi *coal burner*. Untuk kondisi 95% batubara + 5% biomassa temperatur yang dihasilkan lebih tinggi dan merata dibandingkan 95% batubara. Dari gambar kontur di atas, temperatur rata-rata aliran pada *furnace* lebih tinggi dibandingkan dengan saat aliran melewati *heat exchanger*, karena panas dari gas buang diserap oleh masing-masing *heat exchanger*.



Gambar 4. 6 Grafik temperatur pada titik validasi untuk setiap variasi udara pembakaran

TEMPERATUR PADA Z (°C)	1	2	3	4	5	6
100 % Batubara	108 0	84 0	77 0	69 5	64 0	52 0
95 % Batubara	995	81 5	75 0	66 0	60 0	49 0
95 % Batubara + 5 % Biomassa	915	78 5	72 0	62 0	58 0	48 0

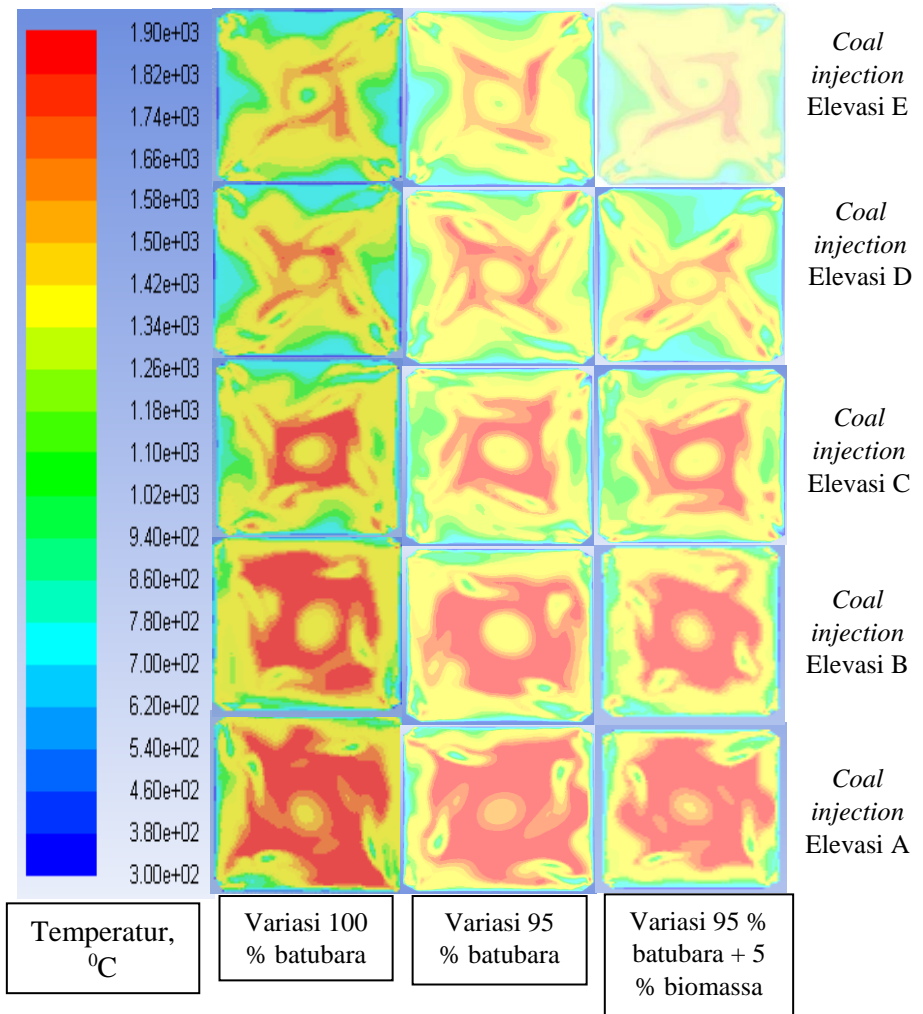
Pada gambar 4.6, menunjukkan grafik penyerapan panas dari masing- masing kondisi variasi bahan bakar pada saat melalui jajaran *heat exchanger*. Tampak bahwa kondisi 95% batubara + 5% biomassa adalah temperatur yang paling optimal jika dilihat dari temperatur pertama kali melalui *superheater* hingga keluar *economizer*. Dapat disimpulkan bahwa penyerapan panas paling baik pada kondisi 95% batubara + 5% biomassa dibandingkan dengan kondisi 100 % batubara dan 95 % batubara.

4.3.1. 2 Distribusi temperatur pada tiap elevasi

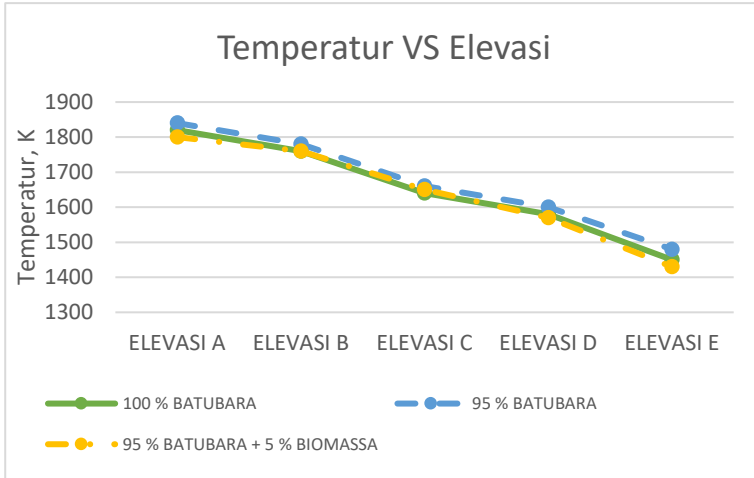
Pengamatan lebih lanjut mengenai distribusi temperatur dilakukan pada setiap elevasi *coal burner boiler*. Dengan pengamatan pada setiap elevasi *coal burner* dapat dilihat bagaimana proses pembakaran antara batubara dan udara pembakaran untuk menghasilkan panas yang dapat dilihat dari sebaran temperatur. Pada gambar 4.7 menunjukkan pengamatan untuk lebih detailnya dengan variasi bahan bakar di tiap elevasi. sedangkan gambar 4.8 menunjukkan grafik temperatur di tiap elevasi.

Gambar 4.7 merupakan kontur temperatur aliran gas buang pada elevasi *coal burner boiler* untuk ketiga variasi penelitian.

Untuk elevasi *coal burner* A, batubara telah terbakar dan menghasilkan temperatur tinggi yang ditandai dengan persebaran warna jingga kemerahan pada luasan *burner*. Pada elevasi *burner* semakin keatas, semakin terbentuk pusat panas (*fire ball*) dimana temperatur pada pusat *burner* cenderung lebih tinggi dibandingkan temperatur sekelilingnya yang merupakan temperatur dari udara pembakaran yang masuk ke dalam *burner*. Udara pembakaran inilah yang memusatkan pembakaran karena selain melakukan proses pembakaran pada batubara juga membatasi pergerakan partikel batubara agar tidak tersebar ke seluruh luasan *burner* yang akan menyebabkan pembakaran tidak merata.



Gambar 4. 7 Kontur distribusi temperatur tiap elevasi burner boiler



Gambar 4. 8 Grafik distribusi temperatur rata-rata pada setiap elevasi burner boiler

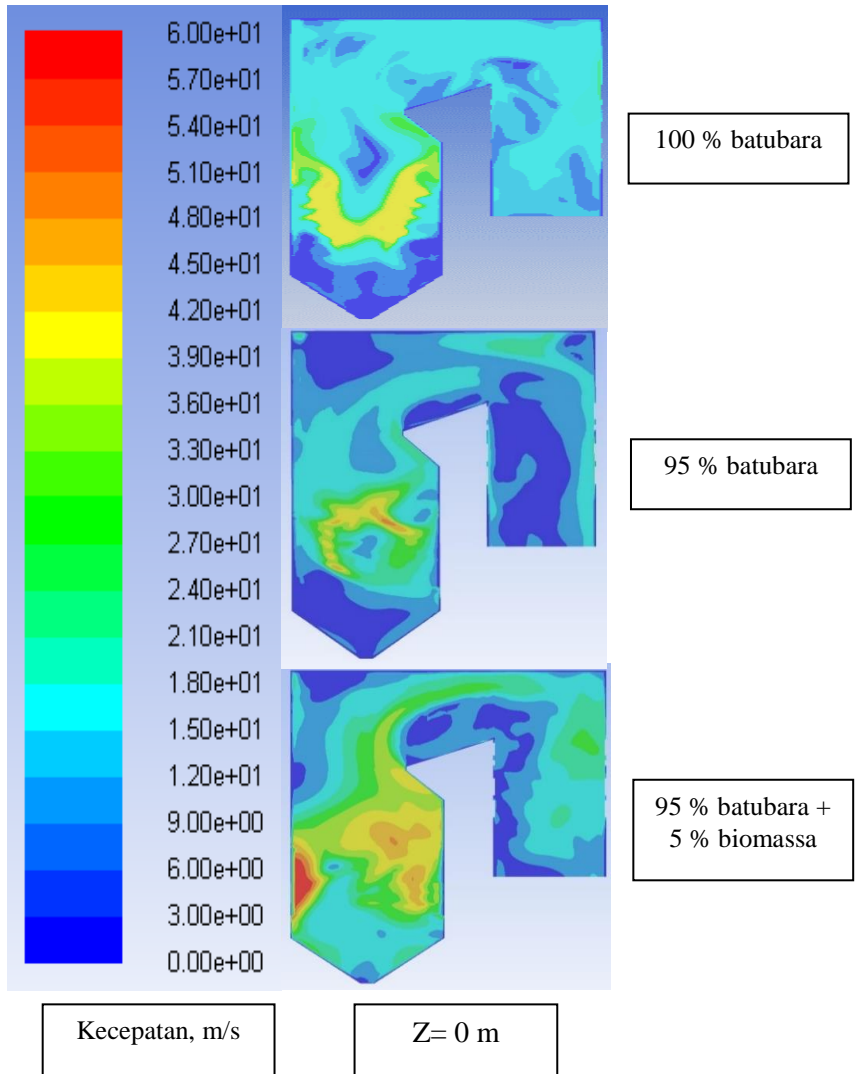
Jika ditinjau dari grafik pada gambar 4.8, menunjukkan bahwa ada peningkatan temperatur. Dapat dilihat secara keseluruhan bahwa peningkatan temperatur tertinggi ada 95% batubara. Terjadi penurunan temperatur dari *coal burner* A sampai dengan *coal burner* E karena penyerapan panas oleh *wall tube*.

4.3. 2 Distribusi Kecepatan

Pada anak subbab ini akan dibahas bagaimana distribusi kecepatan gas buang pada *boiler*, karena dengan mengamati distribusi kecepatan akan memudahkan untuk mengetahui pembentukan pusat api (*fire ball*). Gas buang yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara dengan temperatur tinggi membentuk aliran berputar-putar (*swirling flow*), selain itu juga disebabkan oleh penginjeksian udara pembakaran ke pusat *furnace*. Adanya aliran berputar tersebut menyebabkan pembakaran akan lebih sempurna dan distribusi temperatur lebih merata.

4.3.2. 1 Distribusi Kecepatan pada posisi z=center

Dengan menggunakan simulasi numerik akan didapatkan kontur kecepatan aliran gas buang dalam *boiler*. Gambar 4.9 dibawah ini adalah kontur kecepatan dilihat dari penampang vertikal.



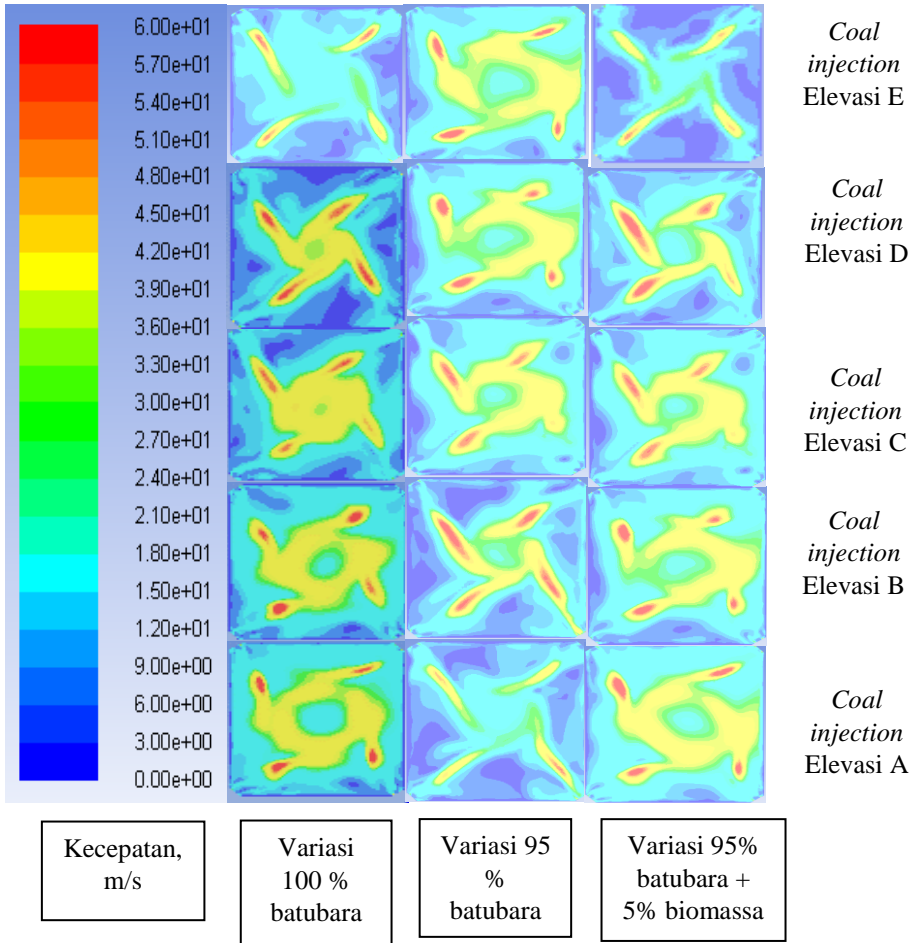
Gambar 4. 9 Kontur kecepatan pada posisi z=center untuk semua kondisi

Dari gambar 4.9 di atas, tampak bahwa pada bagian *center furnace* memiliki kecepatan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan bagian sisi/dinding *furnace*. Terlihat dari kontur kecepatan yang berwarna kuning dibagian *center furnace* dan pada sisi/dinding *furnace* cenderung berwarna biru muda agak kehijauan. Kecepatan gas buang mengalami penurunan saat melewati jajaran *heat exchanger* karena aliran gas buang tersebut menabrak *tube-tube* dari *heat exchanger* yang terlihat dari warna kontur saat melewati *heat exchanger* berubah menjadi biru lebih tua. Pada sudut *boiler* tampak kontur berwarna biru muda yang menunjukkan bahwa kecepatan rendah dikarenakan aliran gas buang di daerah tersebut sangat sedikit, yang artinya penyerapan panas tidak maksimal. Sedangkan di bagian *outlet boiler* kontur kecepatannya memiliki warna yang senada, yaitu didominasi dengan biru muda cenderung tua.

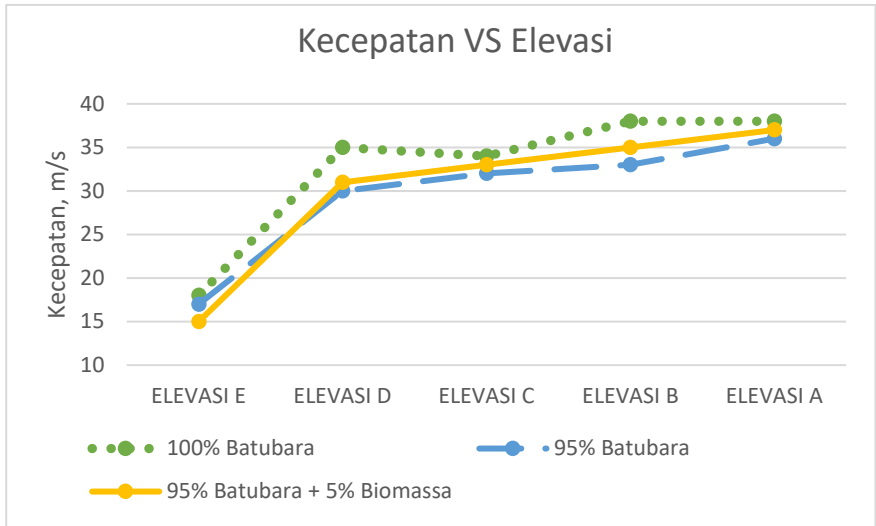
4.3.2. 2 Distribusi Kecepatan pada tiap elevasi

Pengamatan kontur kecepatan pada tiap elevasi *coal burner* memudahkan untuk mengetahui proses terbentuknya pusat api (*fire ball*) di *furnace*.

Gambar 4.10 menunjukkan kontur kecepatan pada penampang horizontal setiap elevasi *coal burner*. Pusaran yang terbentuk karena sudut tangensial dari *burner* sudah tampak mulai dari elevasi terbawah. Pada gambar dibawah, untuk elevasi *coal burner* A dan B terlihat bahwa kecepatan di bagian pusat *furnace* lebih rendah dibandingkan kecepatan pada sudut *coal burner* yang merupakan keluarnya udara pembakaran dan batubara, sehingga terbentuklah pusat api (*fire ball*) dari pusaran tersebut. Pada penelitian ini, didapatkan terjadi pembentukan pusat api (*fire ball*) sejak elevasi *coal burner* A. Perbedaan kecepatan setiap variasi dan elevasi *boiler burner* dipengaruhi oleh besarnya *mass flowrate* bahan bakar yang diinjeksikan.



Gambar 4. 10 Kontur kecepatan tiap elevasi burner boiler



Gambar 4. 11 Grafik distribusi kecepatan rata-rata pada setiap elevasi burner boiler

Pada gambar 4.11 menunjukkan grafik kecepatan diambil pada rata-rata setiap elevasi burner boiler, dari bagian bawah hingga elevasi E. Grafik kecepatan yang dihasilkan memiliki kecenderungan menurun dipengaruhi oleh mass flowrate bahan bakar. Sedangkan pada setiap elevasi burner boiler menunjukkan kecenderungan yang sama dan berfluktuasi mulai elevasi coal burner B hingga elevasi E, hal tersebut dipengaruhi oleh mass flowrate bahan bakar.

4.3. 3 Distribusi Pathline

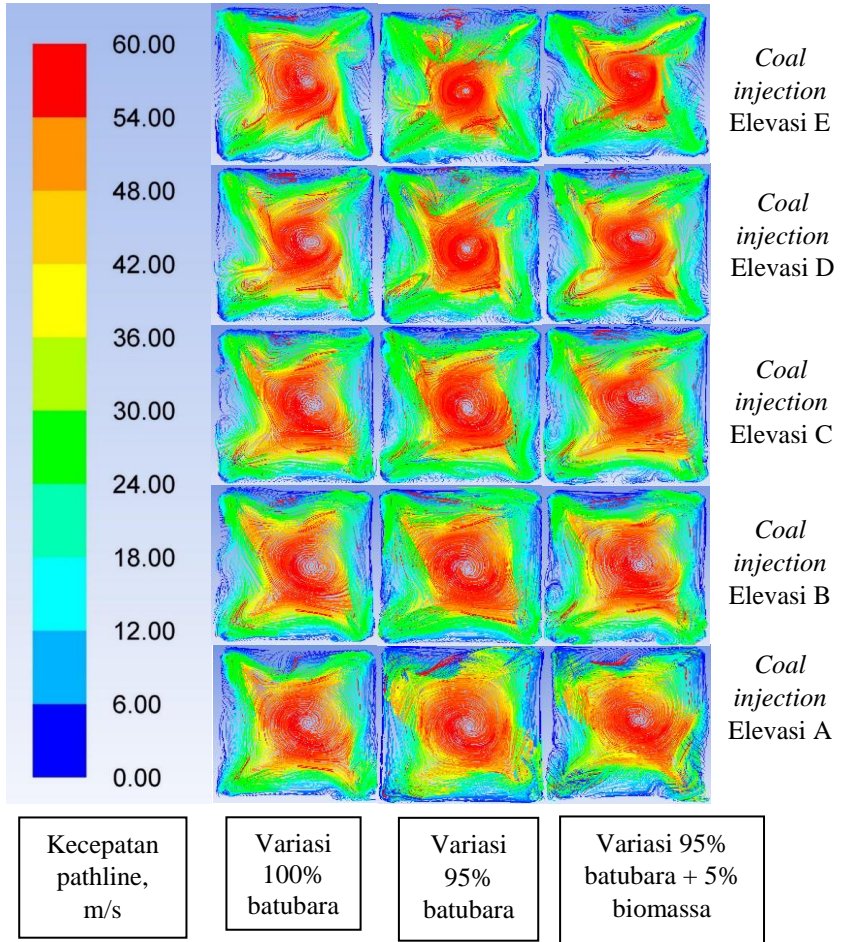
Pada anak subbab ini akan dibahas bagaimana distribusi *pathline* gas buang pada *boiler*, karena dengan mengamati distribusi *pathline* akan memudahkan untuk mengetahui pembentukan pusat api (*fire ball*). Gas buang yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara dengan temperatur tinggi membentuk

aliran berputar-putar (*swirling flow*). Adanya aliran berputar tersebut menyebabkan pembakaran akan lebih sempurna dan distribusi temperatur lebih merata.

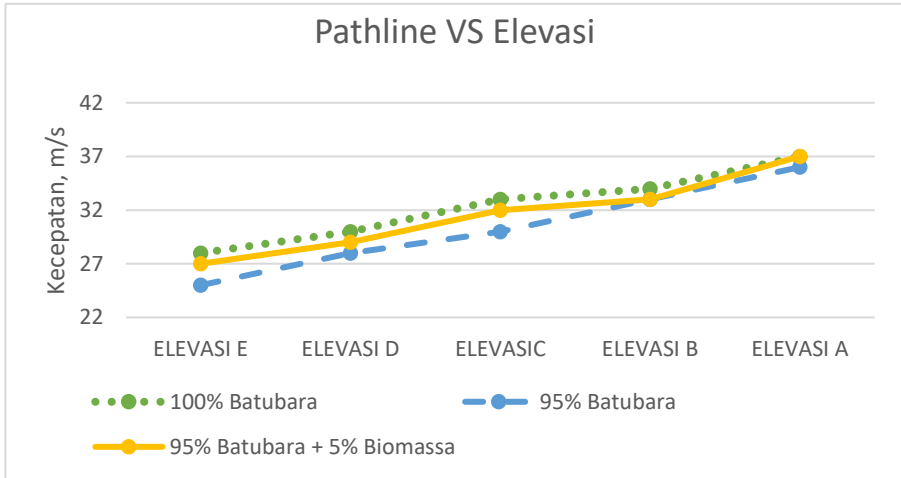
4.3.3. 1 Distribusi Pathline pada tiap elevasi

Pengamatan *pathline* pada tiap elevasi *coal burner* memudahkan untuk mengetahui proses terbentuknya pusat api (*fire ball*) di *furnace*.

Gambar 4.12 menunjukkan kontur kecepatan pada penampang horizontal setiap elevasi *coal burner*. Pusaran yang terbentuk karena sudut tangensial dari *burner* sudah tampak mulai dari elevasi terbawah. Pada gambar dibawah, untuk elevasi *coal burner* A dan B terlihat bahwa *pathline* di bagian pusat *furnace* lebih rendah dibandingkan *pathline* pada sudut *coal burner* yang merupakan keluarnya udara pembakaran dan batubara, sehingga terbentuklah pusat api (*fire ball*) dari pusaran tersebut. Pada penelitian ini, didapatkan terjadi pembentukan pusat api (*fire ball*) sejak elevasi *coal burner* A. Perbedaan *pathline* setiap variasi dan elevasi *boiler burner* dipengaruhi oleh besarnya *mass flowrate* bahan bakar yang diinjeksikan.



Gambar 4. 12 Kontur kecepatan pathline tiap elevasi burner boiler



Gambar 4. 13 Grafik distribusi kecepatan pathline pada setiap elevasi burner boiler

4.3. 4 Data Kuantitatif Boiler

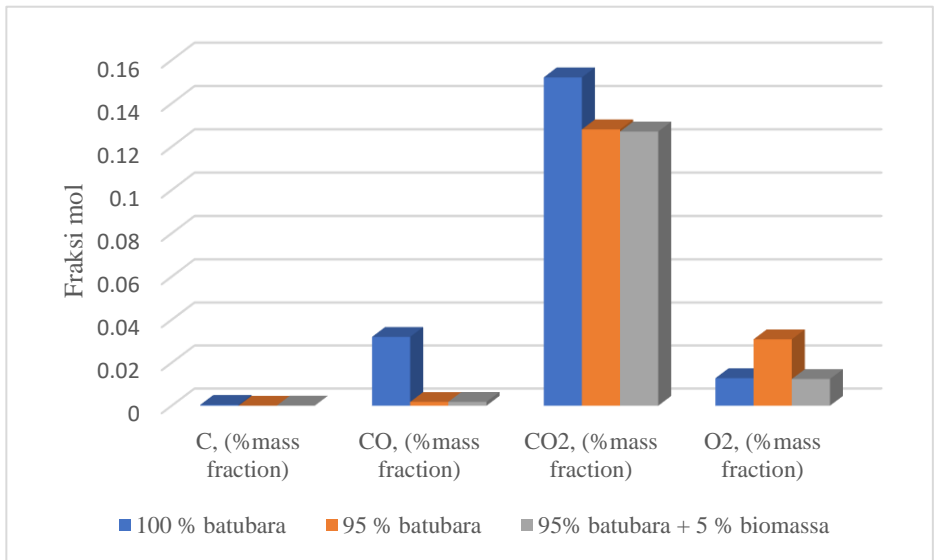
Penelitian ini dilakukan pada PLTU Paiton dengan memvariasikan bahan bakar, yaitu 100% batubara (kondisi aktual); 95% batubara (variasi 1) dan 95% batubara *dan* 5% biomassa (variasi 2). Sedangkan untuk penggunaan batubara dan konfigurasinya mengikuti kondisi aktual ketika beroperasi dengan 5 elevasi dari elevasi A sampai elevasi E. Pengambilan data kuantitatif *boiler* dilakukan pada dua posisi, posisi pertama letaknya pada *outlet boiler* yang akan diambil data komposisi gas buang CO₂, CO dan O₂ serta pada Nose yang akan diambil data komposisi gas buang C. Nilai temperatur akan diambil pada posisi *outlet boiler* atau sesaat memasuki jajaran *heat exchanger*. berikut ini adalah tabel yang menunjukkan hasil pengambilan data kuantitatif pada *boiler*.

Pada tabel 4.1 di bawah ini, dapat dilihat secara kuantitatif *output* dari *boiler*. Dari hasil simulasi, 95% batubara + 5 % biomassa adalah komposisi variasi bahan bakar yang

direkomendasikan. Dengan penambahan 5% biomassa pada bahan bakar didapat penurunan temperatur yang besar dibandingkan kondisi aktual (100% batubara) yaitu sebesar 165 K, dengan begitu diharapkan penyerapan panas pada jajaran *heat exchanger* dapat maksimal dengan temperatur *outlet furnace* yang relatif tinggi. Sedangkan untuk komposisi gas buang CO₂ juga terdapat penurunan yang signifikan.

Tabel 4. 1 Tabel data kuantitatif Nose & outlet Boiler antara kondisi aktual dan pada kondisi dengan variasi bahan bakar pada PLTU Paiton

Parameter	Nose			Outlet Boiler		
	100 % batubara	95 % batubara	95% batubara + 5 % biomassa	100 % batubara	95 % batubara	95% batubara + 5 % biomassa
Temperatur K	1782.58	1803.43	1857.71	501.12	458.04	407.91
C, (%mass fraction)	0.00041	0.00000037 5	0.000030 3	-	-	-
CO, (%mass fraction)	-	-	-	0.032	0.0017 6	0.0018
CO ₂ , (%mass fraction)	-	-	-	0.152	0.128	0.127
O ₂ , (%mass fraction)	-	-	-	0.0128	0.0309	0.0124



Gambar 4. 14 Histogram hasil simulasi dengan variasi udara pembakaran

Jika dilihat pada gambar 4.14, perbedaan temperatur antara nose hingga outlet boiler, nilai tertinggi diperoleh pada kondisi oxy30-coal, artinya penyerapan panas yang terjadi paling besar. Gas CO₂ yang tertinggi dihasilkan ada pada kondisi 100% batubara yaitu 15.65%, untuk gas CO paling sedikit dihasilkan oleh 95 % batubara + 5 % biomassa 0.22%. Sedangkan untuk gas O₂ memang yang tertinggi ada pada kondisi 95 % batubara yaitu 3.38%. Dengan begitu PLTU sebagai penghasil emisi gas rumah kaca (gas CO₂) terbesar dapat diminimalis dan penyerapan panas yang lebih optimal dapat tercapai.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil yang diperoleh dari penelitian Studi Numerik *Co-firing* batubara dan biomassa dengan variasi persentase biomassa terhadap performa pembangkit 400 MW, dapat disimpulkan sebagai berikut :

Berdasarkan hasil simulasi numerik *co-firing* batubara dan biomassa diperoleh validasi dengan nilai *error* terkecil 7,3% pada posisi setelah *out reheater* dan 15.2% pada setelah *input reheater* pada variasi 95% batubara dan 5% biomassa.

Dari hasil numerik, kondisi variasi 95% batubara + 5% biomassa adalah yang direkomendasikan diantara 100% batubara dan 95 % batubara.

Hasil dari simulasi variasi 95% batubara + 5 % biomassa pada sisi *outlet boiler* berupa gas buang dengan komposisi gas CO₂ sebesar 12.7% fraksi massa; gas CO sebesar 0.18% fraksi massa dan gas O₂ sebesar 1.24% fraksi massa serta gas C sebesar 0.003%. Sedangkan untuk temperatur, yang diukur adalah pada posisi *nose* atau sebelum memasuki jajaran *heat exchanger*, tepatnya *superheater* dengan nilai 1857.71 K, dan temperatur *outlet boiler* sebesar 407.91 K. Beda antara temperatur *nose* dan *outlet boiler* adalah 1449.8 K, artinya penyerapan panas yang terjadi paling tinggi diantara kedua kondisi variasi (100% batubara dan 95% batubara)

5.2 Saran

Sebagai saran, kelengkapan data operasional atau *manual book* dari suatu pembangkitan sangat diperlukan. Agar simulasi yang dilakukan dapat benar-benar mendekati kondisi aktual dilapangan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Ansys, Inc. November 2011. **“Perangkat lunak CFD komersial *Theory’s Guide*”**. Canonsburg : Ansys, Inc.
- Putra; Egy Maulana, Munir; Stefano, Sriyanti, (2018). **Optimasi Kinerja Teknologi Co-Firing batubara dengan Biomassa dalam Industri pengguna Batubara**. Universitas Islam Bandung.
- Stroh; Alexander, Alobaid; Falah, Busch; Jan-Peter, Strohle; Jochen, Eppl€; Bernd, (2015). ***3-D Numerical Simulation for Co-Firing of Torrefied Biomass in a Pulverized-Fired 1 M_w Combustion Camber***. Technical University Darmstadt, German.
- Gubba; S.R., Ingham; D.B., Larsen; K.J., Ma;L., Pourkashanian; M., Tan; H.Z., Williams; A., Zhou; H., (2015). ***Numerical Modelling of the Co-Firing of pulverized Coal and Straw in a 300 Mwe tangentially Fired Boiler***.
- Sa'adiyah, D.S. 2013. **“ Studi Numerik Karakteristik Aliran, Pembakaran dan Emisi Gas Buang pada Tangentially Fired Boiler 625 MWe dengan Komposisi Batubara 70% LRC dan 30% MRC pada Kondisi Pengoperasian yang Berbeda (Studi Kasus PLTU Suralaya Unit 8)”**. Teknik Mesin FTI-ITS. Surabaya.
- Singer, JG. 1993. **“*Combustion Fossil Power: A Reference Book on Fuel Burning and Steam Generation 4th Edition*”**. Combustion Engineering-Inc. Connecticut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Data Temperatur pada sumbu z dan tiap elevasi

TEMPERATUR PADA Z	1	2	3	4	5	6
100 % Batubara	1080	840	770	695	640	520
95 % Batubara	945	815	750	660	600	490
95 % Batubara + 5 % Biomassa	915	785	720	620	580	480

TEMPERATUR TIAP ELEVASI	ELEVASI A	ELEVASI B	ELEVASI C	ELEVASI D	ELEVASI E
100 % Batubara	1820	1760	1640	1580	1450
95 % Batubara	1840	1780	1660	1600	1480
95 % Batubara + 5 % Biomassa	1800	1760	1650	1570	1430

Lampiran 2 : Data Pathline pada tiap elevasi

PATHLINE	ELEVASI A	ELEVASI B	ELEVASIC	ELEVASI D	ELEVASI E
100 % Batubara	37	34	33	30	28
95 % Batubara	36	33	30	28	25
95 % Batubara + 5 % Biomassa	37	33	32	29	27

Lampiran 3 : Data Kecepatan pada tiap elevasi

KECEPATAN TIAP ELEVASI	ELEVASI A	ELEVASI B	ELEVASI C	ELEVASI D	ELEVASI E
100 % Batubara	38	38	34	35	18
95 % Batubara	36	33	32	30	17
95 % Batubara + 5 % Biomassa	37	35	33	31	15

Lampiran 4 : Perbandingan Data aktual dan hasil penelitian

TEMPERATUR		1	2	3	4	5	6
Data Aktual		795.7	666.8	610	574.3	526.6	427.8
Hail Fluent	100 % batubara	1080	840	770	695	640	520
	95 % batubara	995	815	750	660	600	490
	95 % batubara + 5 % biomassa	915	785	720	620	580	480
Error %	100% batubara	0.26324	0.20619	0.20779	0.17367	0.17719	0.17730769
	95% batubara	0.2003	0.18184	0.18667	0.12985	0.12233	0.12693878
	95% batubara + 5% biomassa	0.13038	0.15057	0.15278	0.07371	0.09207	0.10875

Lampiran 5 : Data hasil gas buang untuk tiap variasi

Parameter	Nose			Outlet Boiler		
	100 % batubara	95 % batubara	95% batubara + 5 % biomassa	100 % batubara	95 % batubara	95% batubara + 5 % biomassa
Temperatur, K	1782.58	1803.43	1857.71	501.12	458.04	407.91
C, (%mass fraction)	0.00041	0.000000375	0.0000303	-	-	-
CO, (%mass fraction)	-	-	-	0.032	0.00176	0.0018
CO ₂ , (%mass fraction)	-	-	-	0.152	0.128	0.127
O ₂ , (%mass fraction)	-	-	-	0.0128	0.0309	0.0124

Lampiran 6 : Flow bahan bakar tiap variasi

mill	100% Batubara	95% batubara	95% Batubara + 5% Biomassa	
	coal	coal	coal	biomassa
A	13.16611111	9.829513889	9.8295139	3.336597222
B	13.78972222	13.78972222	13.789722	-
C	12.92027778	12.92027778	12.920278	-
D	13.78333333	13.78333333	13.783333	-
E	13.0725	13.0725	13.0725	-

Lampiran 7 : Data Properties Biomassa

TABLE 4.2 Typical Proximate and Ultimate Analyses for Several Biomass Fuels

	Urban Wood			
	Sawdust	Waste	Switchgrass	Corn Stover
Proximate Analysis (wt%)				
Fixed Carbon	9.35	12.58	12.18	15.64
Volatile Matter	55.03	52.56	65.19	71.08
Ash	0.69	4.08	7.63	7.05
Moisture	34.93	30.78	15.00	6.23
Ultimate Analysis (wt%)				
Carbon	32.06	33.22	39.68	43.39
Hydrogen	3.86	3.84	4.95	5.15
Oxygen	28.19	27.04	31.93	37.25
Nitrogen	0.26	1.00	0.65	0.83
Sulfur	0.01	0.07	0.16	0.10
Ash	0.69	3.99	7.63	7.05
Moisture	34.93	30.84	15.00	6.23
Higher Heating Value— as Received (Btu/lb)	5431	5788	6601	7088
Volatile/Fixed Carbon Ratio	5.89	4.20	5.35	4.54

Source: [1, 16, 26].

Lampiran 8 : data Properties Batubara

CERTIFICATE OF SAMPLING AND ANALYSIS

Parameters	Units	Results				Methods
		AR	ADB	DB	DAFB	
Proximate Analysis						
- Total Moisture	% wt	28.22	---	---	---	ASTM D 3302M-15
- Moisture In Analysis	% wt	---	12.43	---	---	ASTM D 3173-11
- Ash Content	% wt	1.92	2.34	2.67	---	ASTM D 3174-12
- Volatile Matter	% wt	36.28	44.26	50.54	51.93	ASTM D 3175-11
- Fixed Carbon	% wt	33.58	40.97	46.79	48.07	ASTM D 3172-13
Total Sulfur	% wt	0.14	0.17	0.19	0.20	ASTM D 4239-14e2
Gross Calorific Value	Kcal/Kg	4772	5822	6648	6831	ASTM D 5865-13

Ultimate Analysis:						
		AR	ADB	DB	DAFB	
- Total Moisture	% wt	28.22	---	---	---	ASTM D 3302M-15
- Moisture In Analysis	% wt	---	12.43	---	---	ASTM D 3173-11
- Ash Content	% wt	1.92	2.34	2.67	---	ASTM D 3174-12
- Carbon	% wt	51.35	62.64	71.53	73.50	ASTM D 5373-14
- Hydrogen (*)	% wt	4.61	5.63	6.43	6.61	ASTM D 5373-14
- Nitrogen	% wt	0.70	0.86	0.98	1.01	ASTM D 5373-14
- Sulfur	% wt	0.14	0.17	0.19	0.20	ASTM D 4239-14e2
- Oxygen (*)	% wt	13.06	15.93	18.19	18.69	ASTM D 3176-15
HGI	Point index		46			ASTM D 409M-12
Size Distribution						
* 70 mm	% wt		---			ASTM D 4749-87 (2012)
- 70 mm	% wt		100			
- 50 mm	% wt		96			
- 32 mm	% wt		76			
- 2.38 mm	% wt		20			

Ash Analysis						
- SiO ₂	% wt		22.88			ASTM D 4326-13
- Al ₂ O ₃	% wt		16.55			
- Fe ₂ O ₃	% wt		13.70			
- CaO	% wt		20.07			
- MgO	% wt		16.17			
- TiO ₂	% wt		0.43			
- K ₂ O	% wt		0.78			
- Na ₂ O	% wt		0.37			
- P ₂ O ₅	% wt		0.09			
- SO ₃	% wt		8.55			
- MnO ₂	% wt		0.25			
Slagging Factor		0.25		(Low)		PO - BB - 42
Fouling Factor		0.47		(Medium)		PO - BB - 42

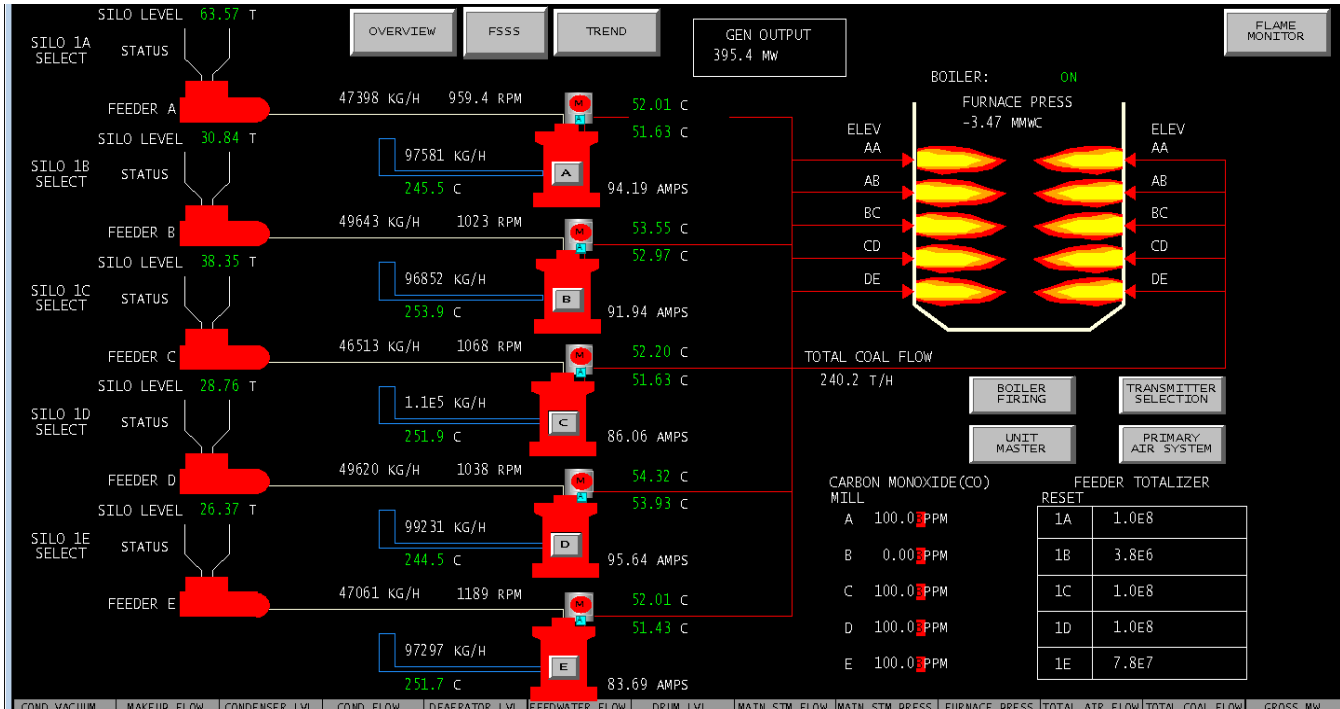
Ash Fusion Temperature						
		Reducing	Oxidizing			
- Initial Deformation	°C	1190	1220	ASTM D 1857M-04 (2010)		
- Softening	°C	1210	1250			
- Hemisphere	°C	1220	1270			
- Flow	°C	1230	1280			

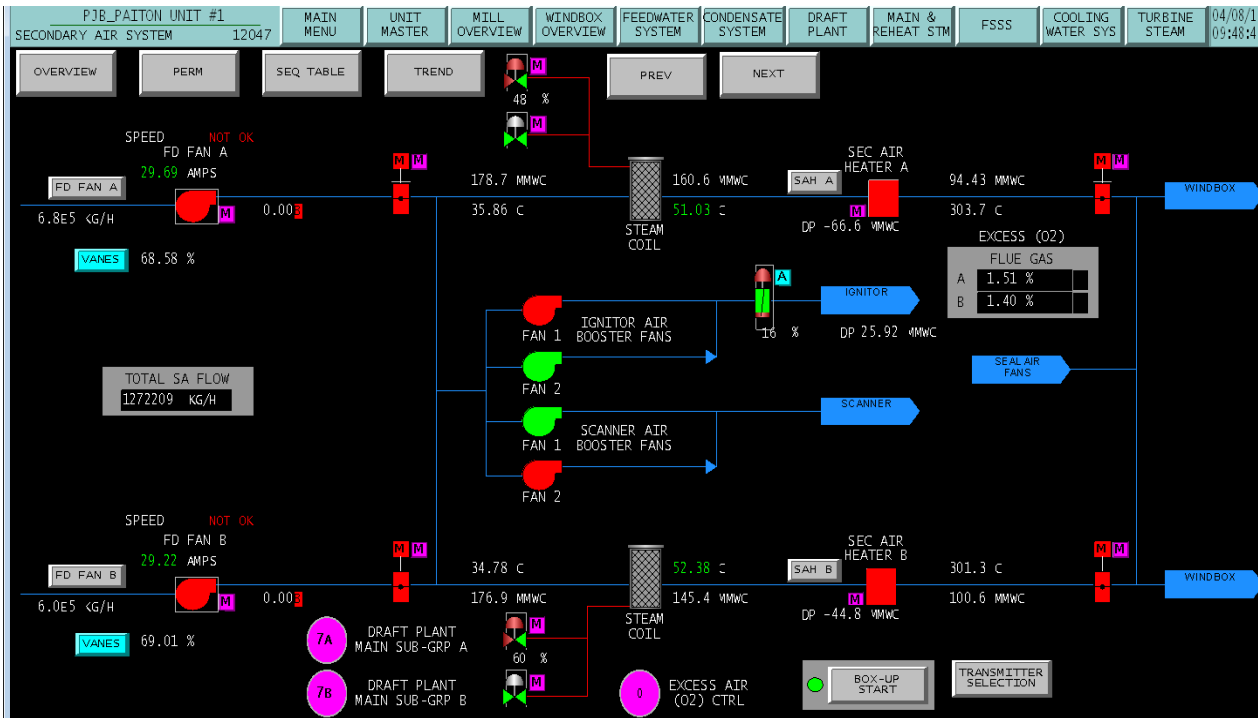
ARB : As Received Basis
ADB : Air Ored Basis

DB : Dry Basis
DAFB : Dry Ash Free Basis

(*) Hydrogen and Oxygen do not include H and O_x sample moisture

Lampiran 9 : Data DCS





Lampiran 10 : Data Temperatur FEGT Paiton

Waktu	Posisi	Temperatur	
		F	C
13,10	T	1606	1037
	ST	2617	1192
	Steng	2040	1235
	SB	2010	1197
	B	1123	928
13,30	T	1702	1030
	ST	2543	1234
	Steng	2060	1211
	SB	2116	1214
	B	1133	935
13,45	T	1801	1038
	ST	2496	1235
	Steng	2077	1264
	SB	2116	1206
	B	1125	920

BIODATA PENULIS



Tomy Alberto Manurung, dilahirkan di Batu raja, 07 Agustus 1998, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Kartika I-4 pada tahun 2003-2009. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Swasta RK Bintang g Timur pada tahun 2009-2012, kemudian penulis melanjutkan pendidikannya di SMA Negeri 4 pada tahun 2012-2015. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Departemen

Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan Akademik maupun non-akademik selama perkuliahan. Penulis Merupakan anggota dari Laboratorium Rekayasa Thermal. Penulis mengikuti kegiatan berorganisasi di lingkup Jurusan sebagai staff departemen pengembangan sumber daya mahasiswa dan tahun berikutnya sebagai kepala departemen pengembangan sumber daya mahasiswa. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui bertotomy7@gmail.com