



TESIS - TM 142501

**STUDI NUMERIK PENGARUH TEMPERATUR
UDARA PRIMER TERHADAP POTENSI
TERJADINYA *SELF COMBUSTION*
DI *COAL PULVERISER MILL***

**AGUSTIN KURNIASTUTI
NRP. 2112 204 808**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD.**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG STUDI REKAYASA ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



THESIS - TM 142501

***NUMERICAL STUDY OF PRIMARY AIR
TEMPERATURE EFFECT TOWARD
SELF COMBUSTION PROPENSITY
IN COAL PULVERIZER MILL***

**AGUSTIN KURNIASTUTI
NRP. 2112 204 808**

**Advisor:
Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD.**

**MASTER PROGRAMME
FIELD STUDY OF ENERGY ENGINEERING
DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AGUSTIN KURNIASTUTI
NRP. 2112 204 808

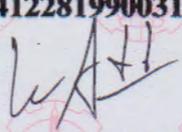
Tanggal Ujian: 26 Januari 2015

Periode Wisuda : Maret 2015

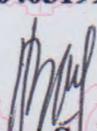
Disetujui oleh:


1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD.
NIP. 196412281990031002

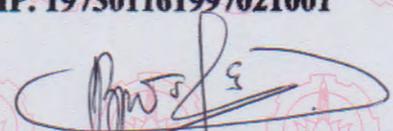
(Pembimbing)


2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT
NIP. 197104051997021001

(Penguji I)

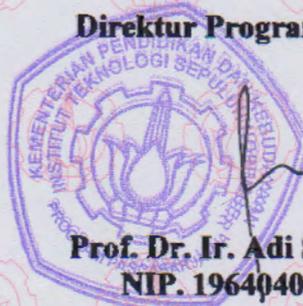

3. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT
NIP. 197301161997021001

(Penguji II)


4. Dr. Bambang Arip D., ST, M.Sc.Eng
NIP. 197804012002121001

(Penguji III)

Direktur Program Pascasarjana,



Prof. Dr. Ir. Adi Suprijanto, M.T.
NIP. 196404051990021001

STUDI NUMERIK
PENGARUH TEMPERATUR UDARA PRIMER
TERHADAP POTENSI TERJADINYA *SELF COMBUSTION*
di *COAL PULVERISER MILL*

Nama Mahasiswa : Agustin Kurniastuti

NRP : 2112 204 808

Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., PhD

ABSTRAK

Dalam sistim PLTU, kapasitas *coal pulveriser mill* dalam menyuplai bahan bakar di dalam *furnace* sangat menentukan terhadap tercapainya pembakaran yang sempurna. Serangkaian proses yang terjadi di dalam *coal pulveriser mill*, yang meliputi *grinding*, *drying* dan *classifying* ditentukan oleh beberapa faktor. Salah satu faktor tersebut adalah ketersediaan udara primer dengan temperatur yang cukup tinggi di dalam *coal pulveriser system*.

Coal pulveriser mill di PLTU Rembang didesain untuk beroperasi menggunakan batubara kalori menengah (MRC). Keterbatasan pasokan MRC menyebabkan *coal pulveriser mill* dipaksa untuk beroperasi menggunakan batubara kalori rendah (LRC). LRC yang digunakan pada *coal pulveriser mill* di PLTU Rembang merupakan tipe *subbituminus*. Karakteristik batubara LRC ini adalah tingginya *moisture* serta *volatile matter* yang terkandung di dalamnya. Untuk mendapatkan batubara yang siap terbakar di dalam *furnace*, kandungan *moisture* di dalam *pulverized fuel* (PF) yang disuplai tidak boleh terlalu tinggi. Hal ini akan menyebabkan terjadinya *delayed combustion* di dalam *furnace*. Salah satu cara untuk menghindari *delayed combustion* ini adalah dengan memberikan suplai udara primer dengan temperatur yang cukup tinggi untuk proses *drying* di dalam *coal pulveriser mill*. Tingginya kandungan *volatile matter* di dalam LRC menyebabkan

batubara tipe ini mudah ter-*self combustion*. Oleh karena itu penambahan temperatur udara primer harus dilakukan dengan hati-hati.

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi untuk menentukan nilai maksimal temperatur udara primer yang diperbolehkan tanpa memicu terjadinya *self combustion* di dalam *coal pulveriser mill*. Dengan menggunakan *software Fluent*, dilakukan tiga variasi seting temperatur udara primer. Metode yang digunakan untuk suplai batubara pada simulasi ini adalah injeksi pada *surface bowl* dengan diameter partikel batubara *fine*. Distribusi *rosin-rammler* digunakan untuk menentukan persebaran partikel di dalam simulasi. Dari simulasi yang telah dilakukan diperoleh bahwa temperatur udara primer pada nilai 448°K menghasilkan *mill outlet temperature (MOT)* sebesar 336°K. Hasil tersebut sudah mendekati nilai MOT yang diijinkan pada operasi *coal pulveriser mill* yaitu 338°K. Jika temperatur udara primer dinaikkan lagi, maka dikhawatirkan akan membahayakan pengoperasian *coal pulveriser mill*. Hasil lainnya yang diperoleh dari simulasi ini adalah kenaikan nilai temperatur udara primer sebesar 463°K dengan kondisi *flowrate* udara dan batubara pada nilai yang konstan akan berdampak pada kenaikan nilai MOT sedangkan kandungan *moisture* di dalam batubara tidak mengalami penurunan yang signifikan.

Kata kunci: *coal pulveriser mill, self combustion, drying, moisture*

**NUMERICAL STUDY
OF PRIMARY AIR TEMPERATURE EFFECT
TOWARD SELF COMBUSTION PROPENSITY
IN COAL PULVERIZER MILL**

Name : Agustin Kurniastuti
NRP : 2112 204 808
Advisor : Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., PhD

ABSTRACT

In coal fired power plant, the capacity of coal pulverizer mill to supply pulverized coal (PF) are play an important role to achive efficient combustion inside furnace. Grinding, drying and classifying which occur inside coal pulverizer mill are determined by some condition. The primary air supply with high enough temperature are important during drying process inside coal pulveriser mill.

In Rembang power plant, coal pulverizer mill are installed to operate with medium coal rank (MRC). Limitation of MRC supply in Rembang power plant has compelled the coal pulverizer mill to operate using Low Rank Coal (LRC). LRC which are in subbituminus class have certain characteristic, they have high moisture and volatile matter content. These characteristic are causing LRC have high propensity to self combust. In order to prevent this, the increasing in primary air temperature must be done with care.

The simulation in this research have purpose to determine the optimal value of primary air temperature that allowed to enter coal pulverizer mill but also prevent self combustion to occur. Three value of primary air temperature are simulate using fluent. Fine coal particle are injected from the bowl surface. Parameter of Rosin-Rammler distribution are calculated using size particle

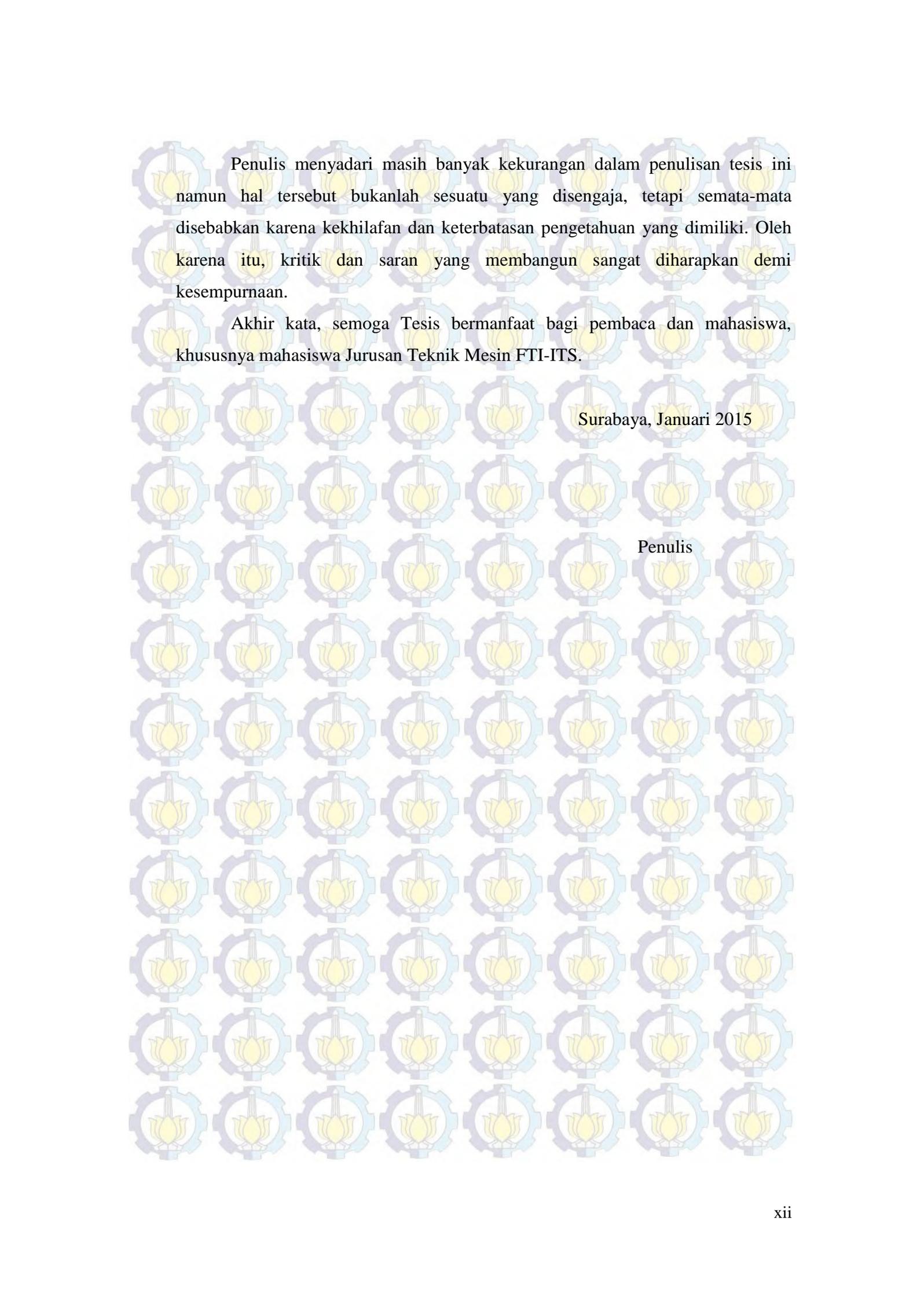
distribution data. From this simulation, with setting the primary air temperature in 448°K it can reach MOT value to 336°K. This MOT value has approach the permissible value in actual operate condition of coal pulverizer mill. More than that primary air temperature, can danger coal pulverizer operation. Another result is increasing primary air temperature to 463°K have the impact in increasing the MOT value but unfortunately the moisture content inside coal particle can't reduce much.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Studi Numerik Pengaruh Temperatur Udara Primer Terhadap Potensi Terjadinya *Self Combustion* di *Coal Pulveriser Mill*”.

Penyusunan tesis ini merupakan persyaratan kelulusan Program Studi S-2 Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari keberhasilan penulisan tesis ini mendapat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dan membantu dalam penulisan tesis ini, antara lain kepada :

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. PhD. selaku dosen pembimbing tesis dan koordinator S-2 Jurusan Teknik Mesin yang sangat membantu mengarahkan dan membimbing penulis dalam prose perencanaan, pelaksanaan dan penyelesaian tesis ini.
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT., Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT., Dr. Bambang Arif D., ST., M.Sc.Eng, selaku dosen penguji tesis penulis.
3. Bapak Nur Ikhwan, ST., M.Eng dan juga bapak Giri Nugroho, ST sebagai dosen yang memberikan banyak ilmu pengetahuan dan penyelesaian pada pengerjaan Tesis ini.
4. PT. PJB Services yang memberikan beasiswa dan kesempatan tugas belajar S2 di Jurusan Teknik Mesin ITS..
5. Orang tua dan keluarga yang selalu mendoakan keberhasilan penulis baik dalam pendidikan, pekerjaan maupun kehidupan.
6. Segenap Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Mesin.
7. Rekan-rekan S-2 Jurusan Teknik Mesin Rekayasa Energi.
8. Rekan-rekan UBJOM yang telah banyak membantu dalam pengambilan data.



Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan tesis ini namun hal tersebut bukanlah sesuatu yang disengaja, tetapi semata-mata disebabkan karena kekhilafan dan keterbatasan pengetahuan yang dimiliki. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan.

Akhir kata, semoga Tesis bermanfaat bagi pembaca dan mahasiswa, khususnya mahasiswa Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul

Title

i

iii

Lembar Pengesahan

v

Abstrak

vii

Abstract

ix

Kata Pengantar

xi

Daftar Isi

xiii

Daftar Gambar

xv

Daftar Tabel

xvii

Bab I Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

1

1.2. Permasalahan

5

1.3. Batasan Masalah dan Asumsi

5

1.4. Tujuan Penelitian

6

Bab II Dasar Teori dan Tinjauan Pustaka

2.1. *Coal Pulveriser Mill*

7

2.2. *Balance Energy Coal Pulveriser Mill*

11

2.3. Karakteristik Batubara

19

2.4. *Spontaneous Combustion* di Dalam *Coal Pulveriser Mill*

24

Bab III Metode Penelitian

3.1. Studi Literatur

35

3.2. Pengumpulan Data Teknis dan Data Operasi

35

3.3. Pemodelan Geometri dan Meshing Menggunakan

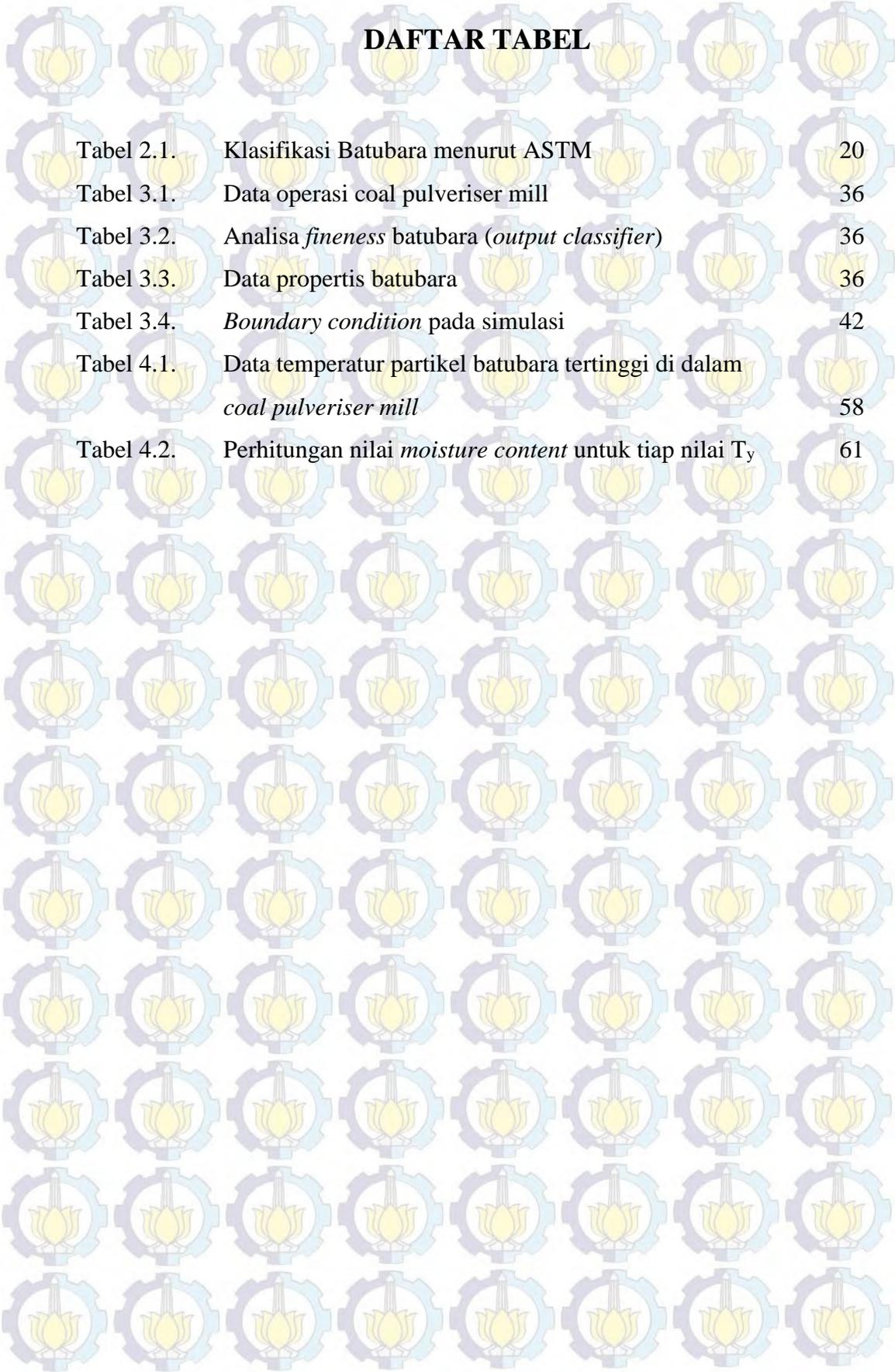
GAMBIT

36

3.3.1. *Pre-processing*

37

	3.3.2. <i>Processing</i>	39
	3.3.3. <i>Post-processing</i>	43
	3.4. Rancangan Simulasi	34
Bab IV	Analisa dan Pembahasan	
	4.1. Validasi	45
	4.2. Analisa Hasil Simulasi Numerik	45
	4.2.1. Distribusi Temperatur Pada x-center ($x=0$)	46
Bab V	Penutup	
	5.1. Kesimpulan	63
	5.2. Saran	64
	Daftar Pustaka	



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Klasifikasi Batubara menurut ASTM	20
Tabel 3.1.	Data operasi coal pulveriser mill	36
Tabel 3.2.	Analisa <i>fineness</i> batubara (<i>output classifier</i>)	36
Tabel 3.3.	Data propertis batubara	36
Tabel 3.4.	<i>Boundary condition</i> pada simulasi	42
Tabel 4.1.	Data temperatur partikel batubara tertinggi di dalam <i>coal pulveriser mill</i>	58
Tabel 4.2.	Perhitungan nilai <i>moisture content</i> untuk tiap nilai T_y	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Letak <i>coal pulveriser mill</i> terhadap <i>boiler</i> pada sistim PLTU	1
Gambar 1.1.	<i>Flow Process Pulveriser System</i> sisi udara dan batubara	2
Gambar 2.1.	<i>HP963 Medium Speed Mill PLTU Rembang</i>	8
Gambar 2.2.	Nilai HGI pada <i>coal pulveriser mill</i> Tipe MPS-89	11
Gambar 2.3.	Balance energi di <i>coal pulveriser mill</i>	12
Gambar 2.4.	Velocity magnitude Hasil simulasi penelitian Bhambare dkk	13
Gambar 2.5.	Distribusi temperatur hasil simulasi penelitian Bhambare dkk	14
Gambar 2.6.	3D Model dan mesh pulverizer Vuthaluru	16
Gambar 2.7.	<i>Coal particle velocity vector</i> pada simulasi Vuthaluru	16
Gambar 2.8.	<i>3D Model dan mesh pulverizer</i>	17
Gambar 2.9.	<i>Outline of geometry along with cross section of interest</i>	18
Gambar 2.10.	Pengaruh variasi seting velocity udara untuk elevasi $y=2.26$	19
Gambar 2.11.	<i>Coal rank ratio as a function of hydrogen/carbon and oxygen/carbon atomic ratio</i>	23
Gambar 2.12.	Mekanisme terjadinya pembakaran	24
Gambar 2.13.	Grafik temperatur batubara ter-self combustion hasil penelitian Ren	27
Gambar 2.14.	Sebab-sebab umum terjadinya kebakaran di Coal Pulveriser mill	30
Gambar 2.15.	Grafik drying process secara umum	31
Gambar 3.1.	Geometri coal pulverizer mill PLTU Rembang	37
Gambar 3.2.	Display meshing coal pulverzer mill	39

Gambar 3.3.	Domain pemodelan pulverizer mill PLTU	40
Gambar 3.4.	Setup properti injeksi batubara pada rencana simulasi	41
Gambar 4.1.	Grafik Perbandingan Nilai MOT aktual dengan hasil Running Fluent	45
Gambar 4.2.	Distribusi temperatur di dalam mill	46
Gambar 4.3.	Zona pengambilan data distribusi temperatur (K) di dalam mill sepanjang elevasi y	47
Gambar 4.4.	Distribusi temperatur di dalam mill pada kordinat $x = -1.6$	48
Gambar 4.5.	Distribusi temperatur di dalam mill pada kordinat $x = 1.6$	49
Gambar 4.6.	Distribusi temperatur di dalam mill pada kordinat $x = 0$ (center mill)	49
Gambar 4.7.	Pengambilan data distribusi temperature (K) dan velocity (m/s) pada elevasi y tertentu	50
Gambar 4.8.	Grafik data distribusi temperature (K) pada elevasi y tertentu	51
Gambar 4.9.	Grafik data distribusi velocity (m/s) pada elevasi y tertentu	52
Gambar 4.10.	Tampak atas penampang melintang distribusi temperatur di dalam coal pulveriser mill untuk elevasi y tertentu	54
Gambar 4.11.	Particle track di dalam coal pulveriser mill	55
Gambar 4.12.	Distribusi partikel batubara berdasarkan nilai temperaturnya	57



DAFTAR PUSTAKA

Bhambare K. S, Zhanhua Ma, Pisi Lu. 2010. “*CFD modeling of MPS coal mill with moisture evaporation*”. *Fuel* volume 91, page 566–571

Dodds, D., Naser, J., Alam, F., Siddique, H. 2010. “*CFD Modelling of Flow and erosion in coal pulverizing mill*”. *Proceedings of the 13th Asian Congress of Fluid Mechanics (13ACFM), Dhaka, Bangladesh*, pp. 719-722.

Gills A. B. 1984. *Power Plant Performance*. Butterworths and Co Ltd, 1st edition.

Holtshauzen, G. 2008. “*Coal pulveriser maintenance performance enhancement through the application of a combination of new technology*”. *University of Johannesburg, Mechanical and Manufacturing Engineering Specialisation Maintenance Engineering*.

Korte G. J., Mangena S. J., 2004. “*Thermal drying of fine and ultra-fine coal*”. *Division of Mining Technology, Coaltech 2020. Report no. 2004 - 0255*

Macintosh J. M., 1976. “*Mathematical model of drying in a brown coal mill system*”. *Fuel* volume 55, pages 47-52. Elsevier.

Miller G. B., Tillman D. A., 2008. “*Combustion engineering issues for solid fuel system*”. Elsevier, Inc. ISBN: 978-0-12-373611-6.

Moran J. M., Saphiro N. H., 2004. “*Termodinamika Teknik*”, Jilid 2, edisi ke-4. Penerbit Erlangga

Nugroho, Y.S., and Saleh, M., “*Effect of Moisture and Initial Temperature on Rate of Spontaneous Combustion of a Low-rank Coal*”, *Proceeding of the 12th National Seminar in Industrial Research and Technology, Yogyakarta, 2006* ISBN 979-95620-3-1, pp.

PT PLN (Persero) Jasa Manajemen Konstruksi. 2010. “*HP963 Medium Speed Mill Instruction Manual*”. Shanghai Heavy Machinery Plant Co., Ltd



Ren, T.X, Edwards J. S, Clarke D., 1999. “*Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous combustion*”. *Fuel* volume 78, page 1611-1620, Elsevier

Sujanti W. 1999. “*Laboratory studies of spontaneous combustion of a coal: the influence of inorganic matter and reactor size*”. *Fuel* volume 78 pages 549-556, elsevier.

Tsuji H., Gupta Ashwani, K., Hasegawa, T., Katsuki, M., Kishimoto, K., Morita, M. 2003. “*High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction (Environmental & Energy Engineering)*”. CRC Press, 1st edition.

Vuthaluru, H.B., Pareek, V.K., Vuthaluru, R. 2005. “*Multiphase flow simulation of a simplified coal pulverizer*”. *Fuel Processing Technology* volume 85, page 1195-1205. Elsevier.

Vuthaluru, R., Kruger, O., Abhishek, M., Pareek, V.K., Vuthaluru, H. B. 2006. “*Investigation of wear pattern in a complex coal pulveriser using CFD Modelling*”. *Fuel Processing Technology* volume 87, page 687-694. Elsevier.

RIWAYAT PENULIS



AGUSTIN KURNIASTUTI, lahir di Surabaya, 28 Agustus 1982. Memulai pendidikan di SD Muhammadiyah 6 Surabaya, melanjutkan ke SMP Muhammadiyah 4 Surabaya, setelah itu menempuh pendidikan di SMUN 10 Surabaya.

Pada tahun 2000 menempuh pendidikan diploma selama 3 tahun di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Elektro – Computer Control. Pada tahun 2004 penulis bekerja di PT Surabaya Autocomp Indonesia dengan posisi sebagai Staff Quality Assurance. Setelah setahun bekerja, pada tahun 2005 penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Elektro bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.

Penulis mulai bekerja di PT PJB Services pada tahun 2009. Tahun 2013 penulis menempuh pendidikan S-2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Mesin bidang keahlian Rekayasa Energi.

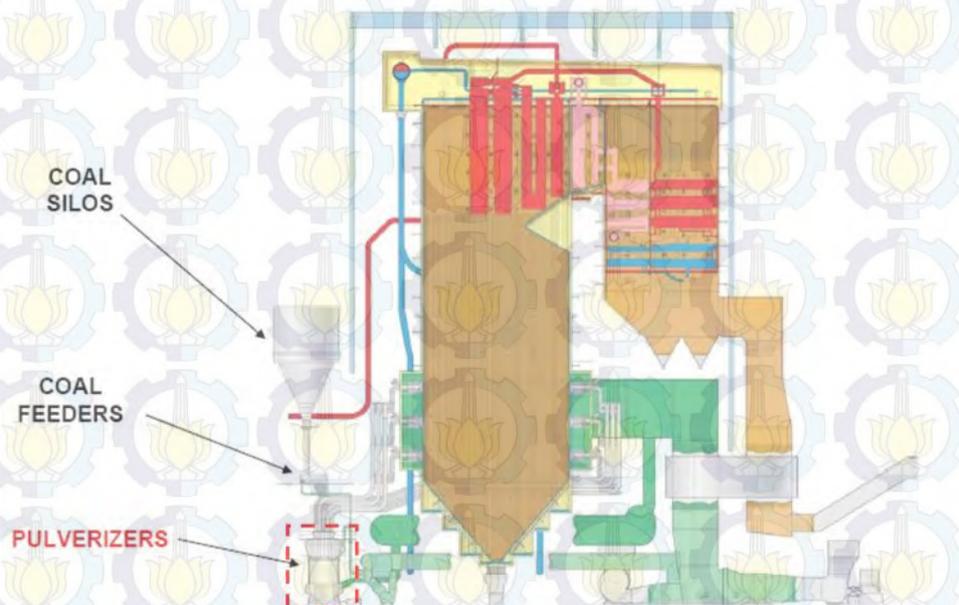
Untuk memudahkan kritik dan saran yang membangun dapat mengirim email ke mle.agustine@gmail.com



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam sistem PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), *coal pulveriser mill* memegang peranan penting dalam tercapainya pembakaran yang efisien di dalam *furnace* (ruang bakar). Apabila proses di dalam mill berjalan baik maka batubara yang diumpankan ke *boiler* memenuhi persyaratan untuk mencegah terjadinya *delayed combustion*. Untuk dapat terbakar sempurna di dalam *furnace*, batubara harus memiliki waktu tinggal (*reside time*), t_r , di mana akan terbentuk gas yang siap terbakar di dalam *furnace*. Gambar 1.1 menunjukkan posisi pemasangan *coal pulveriser mill* terhadap *boiler* di dalam sistem PLTU.

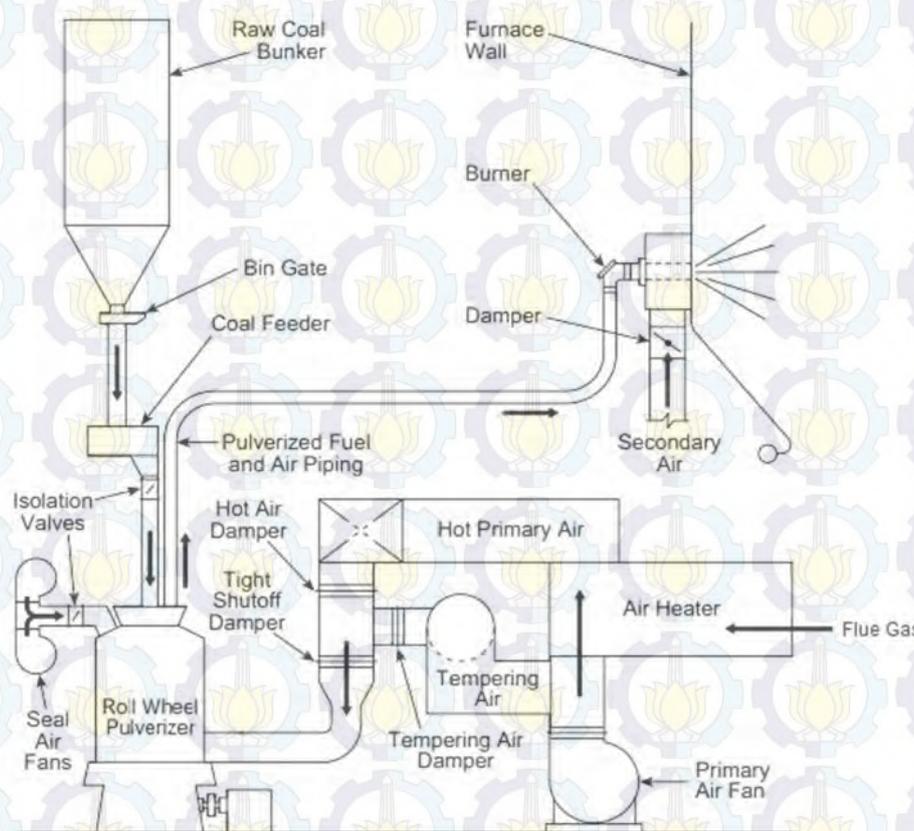


Gambar 1.1. Letak coal pulveriser mill terhadap boiler pada sistem PLTU
(Babcock&Wilcox, 2005)

Batubara yang keluar dari *coal pulveriser mill* akan langsung diumpankan ke ruang bakar melewati pipa pengumpan bahan bakar ke *furnace*. Tidak ada proses lain yang terjadi pada batubara di sepanjang pipa menuju

furnace. Oleh karena itu, untuk mendapatkan proses pembakaran di ruang bakar yang sempurna, kapasitas dari *coal pulveriser mill* harus benar-benar diperhatikan. Batubara yang keluar dari *coal pulveriser mill* adalah batubara yang sudah siap dibakar.

Proses suplai udara primer dan batubara ke dalam *coal pulveriser mill* ditunjukkan pada gambar 1.2.



Gambar 1.2. Flow Process Pulveriser System sisi udara dan batubara.
(Babcock&Wilcox, 2005)

Pembangunan PLTU Rembang didesain untuk batubara kalori menengah (MRC) yang nilai kalornya 4.500 kCal/kg. Namun, karena keterbatasan pasokan batubara tipe ini maka seringkali pengoperasian PLTU Rembang menggunakan batubara kalori rendah (LRC) yang nilai kalornya 4.200 kCal/kg. Jenis batubara LRC yang digunakan adalah *sub-bituminus*, salah satu karakteristiknya adalah memiliki kandungan *moisture* yang cukup tinggi. Oleh



karenanya, diperlukan udara primer dengan temperatur yang lebih tinggi untuk proses *drying* di dalam mill dibandingkan ketika menggunakan MRC. Gambar 1.2, menunjukkan sebagian dari udara primer yang masuk ke dalam *coal pulveriser mill* dipanaskan terlebih dahulu di dalam *air heater*. Sehingga diperoleh temperatur udara yang diinginkan untuk proses *drying* di dalam *coal pulveriser mill*.

Setting *mill outlet temperatur* (MOT) berpengaruh terhadap seberapa besar damper udara primer sisi panas terbuka. Setting MOT yang diperbolehkan untuk *medium speed mill* tipe HP963, seperti yang digunakan di PLTU Rembang ini adalah maksimal sebesar 150°F (65°C). (Rembang, *Medium Speed Mill Instruction Manual*). Pada kondisi operasi yang sebenarnya, setting MOT yang digunakan berkisar antara 55 ~ 58°C. Kesalahan dalam penentuan setting MOT dapat menyebabkan batubara terbakar (*spontaneous combustion*) ketika masih berada di dalam *coal pulveriser mill*.

Saat ini *spontaneous combustion* di dalam mill menjadi permasalahan yang cukup sering dialami, khususnya untuk batubara LRC. Tingginya nilai *volatile matter* yang terdapat pada batubara *sub-bituminus* ini, maka perubahan temperatur udara primer yang signifikan akan memicu terjadi *ignition* awal batubara. Padahal dengan mengalirkan udara primer dengan temperatur yang tinggi akan menyelesaikan masalah tingginya kandungan *moisture* pada LRC. Beberapa penelitian telah dilakukan terkait masalah *spontaneous combustion* batubara LRC serta permasalahan pada *coal pulveriser mill*.

Sujanti (1999) melakukan studi laboratorium untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang menjadi penyebab terjadinya *spontaneous combustion* pada batubara jenis *lignite (brown coal)*. Dari penelitiannya ini diketahui bahwa proses *spontaneous combustion* batubara sangat dipengaruhi oleh temperatur kritis. Untuk tiap jenis batubara akan memiliki nilai yang berbeda tergantung propertisnya.



Ren dkk (1999) meneliti tentang potensi terjadinya *spontaneous combustion* pada beberapa *sampling* batubara. Beberapa batubara *sampling* yang digunakan, diuji pada temperatur 60°C sesuai dengan temperatur di dalam mill. Oleh Ren, *Spontaneous combustion* diranking berdasarkan IRH (*initial rate of heating*) dan TTR (*total temperature rise*) batubara. Dari penelitiannya diketahui bahwa kelembaban udara memegang peranan penting dalam menentukan apakah proses pemanasan berlangsung cepat atau lambat. Nilai IRH dan TTR dipengaruhi oleh ukuran partikel batubara, semakin kecil ukuran partikel maka batubara semakin reaktif.

Bhambare dkk (2010) melakukan pemodelan *moisture evaporation* di dalam *coal pulveriser mill* dengan menggunakan CFD. Hasil dari penelitiannya menunjukkan bahwa proses *coal drying* akan berpengaruh terhadap perubahan temperatur udara primer serta *flow rate* udara akibat *mass transfer* dari batubara. Selain itu, diketahui juga bahwa perubahan massa, gaya dan panas antara udara primer dan batubara sangat berpengaruh terhadap *aerodynamic* yang terjadi di dalam mill.

Vuthaluru dkk (2005) melakukan pemodelan *coal pulveriser mill* sederhana untuk mengetahui aliran fluida *gas-solid* yang terbentuk di dalam *coal pulveriser mill*. Simulasi dilakukan untuk dua ukuran partikel batubara yaitu 100 μm dan 500 μm . Hasil dari simulasinya diperoleh bahwa ukuran partikel batubara akan mempengaruhi *pathlinenya*. Semakin kecil ukuran partikel batubara, maka *pathline* yang terbentuk akan mengikuti dari *pathline* udara yang membawanya. Dengan kata lain, semakin kecil ukuran partikel batubara maka batubara akan mudah terbawa oleh udara.

Vuthaluru dkk (2006) melakukan pemodelan *coal pulveriser mill* untuk mengetahui *wear pattern* akibat variasi *velocity* udara primer. Dari simulasinya, diperoleh bahwa daerah yang memiliki *velocity* tertinggi berada di daerah *throat* berseberangan dengan *duct* inlet udara. Hal ini dianggap sebagai faktor penting meningkatnya *wear pattern* pada *pulveriser coal mill*.



1.2. Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, dapat dirumuskan permasalahan yang ada pada pengoperasian *coal pulveriser mill* di PLTU Rembang sebagai berikut:

- a. Keterbatasan pasokan batubara tipe kalori rendah (MRC) di PLTU Rembang
- b. *Coal pulveriser mill* yang terpasang di PLTU Rembang didesain untuk beroperasi dengan batubara MRC
- c. Perubahan setting pengoperasian *coal pulveriser mill* untuk batubara LRC sedangkan standar operasi yang ada masih untuk batubara MRC.
- d. Belum ada batasan maksimal untuk temperatur udara primer yang diperbolehkan untuk pengoperasian *coal pulveriser mill* menggunakan batubara tipe kalori rendah (LRC)
- e. Tingginya kandungan *moisture* di dalam batubara yang keluar dari *coal pulveriser mill* mengakibatkan *delayed combustion* di *furnace*.
- f. Faktor-faktor penyebab terjadinya *spontaneous combustion* di dalam *coal pulveriser mill* masih belum diketahui secara pasti.

1.3. Batasan Masalah dan Asumsi

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, maka batasan masalah yang digunakan meliputi:

1. *Coal pulveriser mill* yang dimodelkan adalah *coal pulveriser mill* yang digunakan di PLTU Rembang unit 1
2. Batubara yang digunakan untuk simulasi adalah batubara LRC.
3. Perubahan cuaca diabaikan, temperatur *ambient* di sekitar *coal pulveriser mill* tetap.
4. Semua batubara lolos *classifier*, diameter partikel ditentukan.
5. Tidak mempertimbangkan batubara yang menempel di bagian dalam *coal pulveriser mill body*.
6. Tidak mempertimbangkan *coal reject*.



7. Pengamatan hasil simulasi dilakukan pada distribusi temperatur di dalam *coal pulveriser mill*.
8. Validasi model adalah dengan membandingkan nilai MOT aktual dengan MOT hasil simulasi.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- a. Mendapatkan temperatur udara primer optimal yang diijinkan untuk proses *drying* batubara LRC di dalam *coal pulveriser mill*.
- b. Menghindari terjadinya *spontaneous combustion* akibat perubahan temperatur udara primer di dalam *coal pulveriser mill*.



BAB II

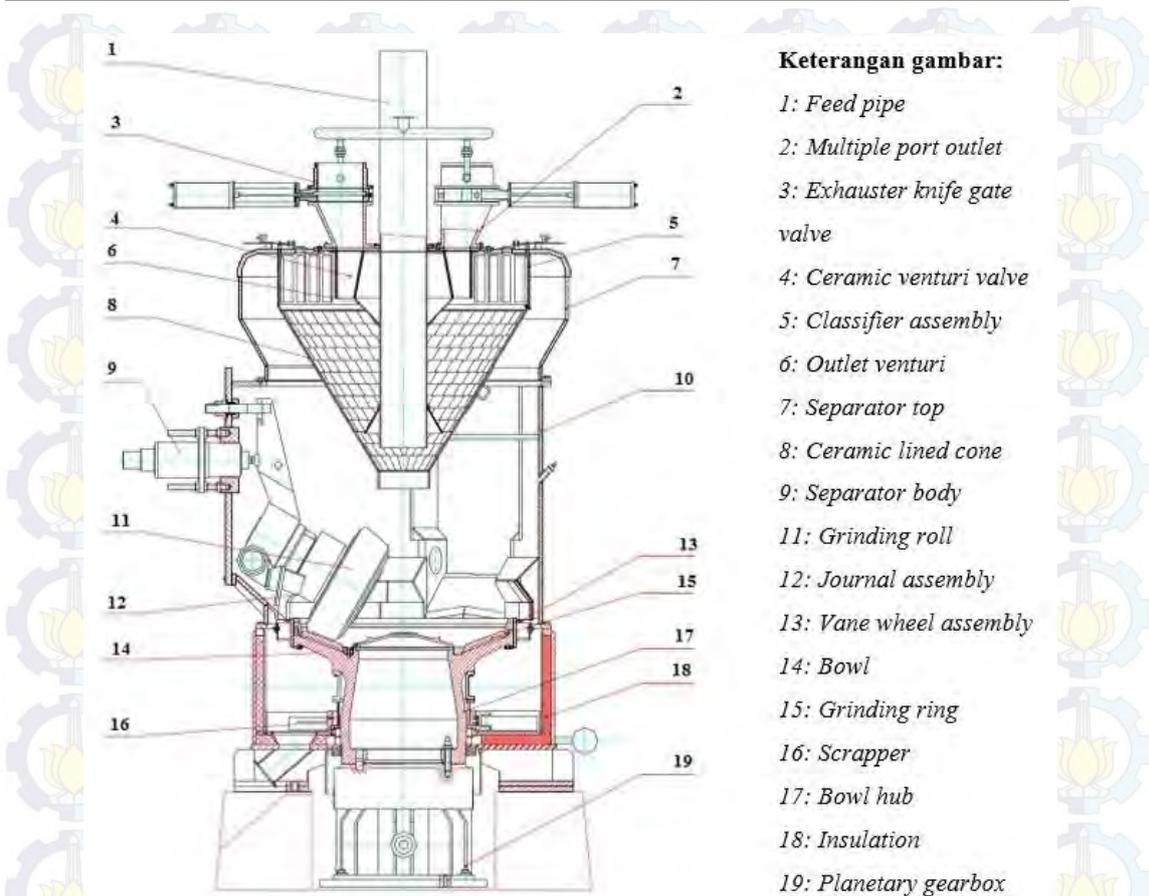
DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Coal Pulveriser Mill

Dalam sistem PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), *coal pulveriser mill* memegang peranan penting dalam tercapainya pembakaran yang efisien di dalam *furnace* (ruang bakar). Batubara dari coal yard, sebelum dapat dimanfaatkan untuk pembakaran di *furnace* harus melewati proses tertentu di dalam *coal pulveriser mill*, di antaranya :

- a. Dilembutkan (*grinded*) berlangsung di *bowl* di dalam *coal pulveriser mill*. Batubara dari *coal inlet pipe* akan langsung jatuh di tengah *bowl*. Oleh pergerakan putaran *bowl*, batubara akan terarah ke pinggir sehingga dapat dilembutkan oleh *grinder roll*. Tujuan dari proses grinding ini adalah untuk mendapatkan batubara berukuran kecil (75 μm / 200 mesh), untuk mempercepat proses pembakaran di dalam *furnace*.
- b. Dikeringkan (*dryed*). Ketika udara primer masuk ke dalam *coal pulveriser mill* melalui *vane-wheel* maka turbulensi dari udara primer ini akan mampu mengangkat partikel batubara ke atas menuju area separasi. Pada saat ini, udara primer yang memiliki temperatur tinggi akan berfungsi sebagai pengering batubara di dalam *coal pulveriser mill*.
- c. Diklasifikasi (*classified*). Batubara dalam bentuk partikel kecil, akan diklasifikasi oleh *classifier* berdasarkan *fineness* yang diinginkan, yaitu 75 ~ 80% partikel batubara lolos 200 mesh.

Gambar 2.1. menunjukkan bagian-bagian *coal pulveriser mill* secara umum.



Gambar 2.1. HP963 Medium Speed Mill PLTU Rembang
(Rembang Manual Book Mill, 2010)

Berdasarkan gambar 2.1, bagian-bagian *coal pulveriser mill* secara umum dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. *Feed Pipe* atau disebut juga *coal inlet pipe*, merupakan jalur masuk batubara dari yang akan digunakan pada pembakaran di *furnace*
- b. *Coal pulveriser mill Body*, di dalamnya terdapat:
 - *Bowl*
 - 3 buah *grinder roll*

Di *body* ini terjadi proses grinding, *gravity separation* (di mana hanya butiran kecil batubara yang dapat terangkat oleh udara primer) serta proses *drying*.

- c. *Classifier*, merupakan bagian *coal pulveriser mill* yang memisahkan batubara yang sudah *fineness* (200 mesh)
- d. *Vane-wheel*, merupakan damper yang dipasang dengan sudut kemiringan 45°C. Udara primer masuk ke dalam *coal pulveriser mill*



akan membentuk turbulensi yang dapat membantu mengangkat partikel batubara yang sudah tergrinding.

Di PLTU Rembang dipasang lima unit *coal pulveriser system*, masing-masing sistim terdiri atas satu *coal bunker*, satu *coal feeder* dan satu *coal pulveriser mill*. Tiap *coal pulveriser mill* dapat menyuplai batubara menuju *furnace*. Untuk operasi PLTU pada beban penuh, diperlukan empat unit *coal pulveriser system* beroperasi dan satu unit untuk *standby*.

Batubara yang keluar dari *coal pulveriser mill* harus memenuhi syarat untuk pembakaran sempurna. Batubara keluaran dari *coal pulveriser mill* diharapkan memiliki kandungan *moisture* yang cukup rendah ketika masuk ke *furnace* untuk mencegah terjadinya *delayed combustion*.

Udara primer yang digunakan untuk transportasi dan pengering batubara di dalam *coal pulveriser mill* merupakan campuran antara udara panas dan udara dingin. Berdasarkan gambar 1.2, proses yang terjadi di dalam *coal pulveriser mill* mulai dari suplai udara dan batubara dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Udara panas dari *fluegas* dilewatkan ke *air heater* untuk dimanfaatkan sebagai pemanas udara primer.
2. Udara dari sekitar dihisap oleh *primary air fan* menuju *furnace*
3. Udara primer sebagian dilewatkan *air preheater* untuk dipanaskan dan sebagian lainnya (*tempering air*) langsung menuju ke *coal pulveriser mill*. Sehingga udara primer yang masuk ke dalam *coal pulveriser mill* memiliki temperatur yang cukup tinggi untuk proses *drying* batubara LRC di dalam *coal pulveriser mill*.
4. Dari *coal raw bunker*, batubara diumpankan ke dalam *coal pulveriser mill* melewati *coal feeder*.
5. Di dalam *coal pulveriser mill*, udara primer bercampur dengan batubara dan membawa butiran batubara menuju *furnace*.



Terbatasnya kerja suatu *coal pulveriser mill* akan menyebabkan berkurangnya output dari *plant* secara keseluruhan (Gills,1984). Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian *coal pulveriser mill*:

- Setting temperatur *outlet mill* (MOT) harus sesuai dengan ketentuan operasi. Setting MOT yang terlalu rendah, akan menyebabkan batubara tidak terkeringkan dengan baik sehingga dapat mengakibatkan *plugging* di dalam *coal pulveriser mill* maupun di *outlet pipe*. Setting MOT yang terlalu tinggi akan berpotensi terjadinya *spontaneous combustion* di dalam *coal pulveriser mill*. Setting MOT untuk batubara *subbituminus* yang diperbolehkan adalah 150°F (65°C).
- Batubara keluaran dari *coal pulveriser mill* harus sesuai dengan yang diharapkan, baik dalam hal *fineness* maupun ukuran. *Fineness* yang terlalu tinggi akan menyebabkan turunnya kapasitas *pulveriser mill* serta naiknya konsumsi daya motor *coal pulveriser mill*. Sebaliknya, *fineness* yang terlalu rendah akan mempengaruhi kerja boiler.
- Drying Capacity*. Dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu *mass flow* dan temperatur udara yang masuk ke dalam *coal pulveriser mill*. Semakin tinggi temperatur maka kebutuhan udara untuk proses pengeringan batubara di dalam *coal pulveriser mill* akan berkurang. (Gills 1984)

$$W_f = \frac{A_o}{1 + \beta} \times \frac{T_i - T_o}{M_c} \times 4.043 \times 10^4 \quad (2.1)$$

$$\beta = \frac{A_o - A_i}{A_i} \quad (2.2)$$

di mana: W_f = *coal throughput* (kg/s)

A_o = *air flow at pulveriser mill outlet* (kg/s)

A_i = *air flow at pulveriser mill inlet* (kg/s)

β = *leakage factor*

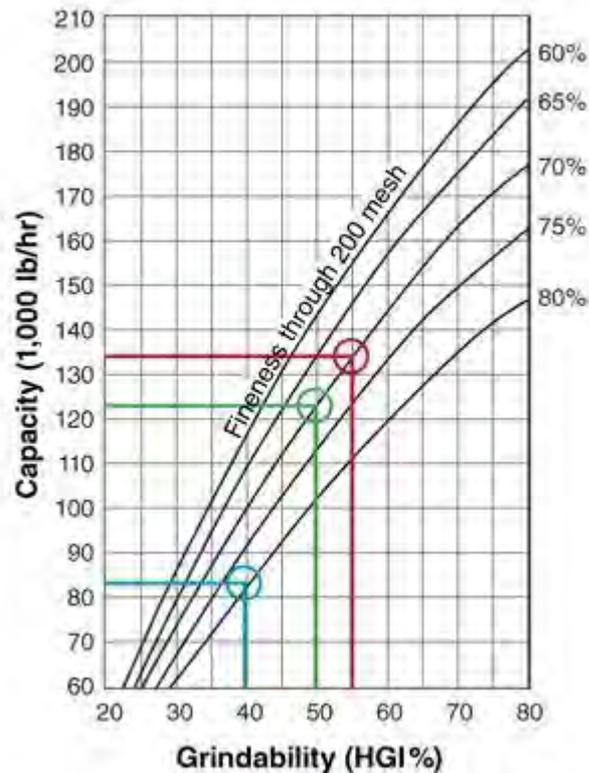
T_i = *air temperature at pulveriser mill inlet* (C)

T_o = *air temperature at pulveriser mill outlet* (C)

M_o = *total moisture fraction of coal*



d. *Hardgrove Grindability Index* (HGI). Merupakan nilai yang menunjukkan kemampuan *coal pulveriser mill* untuk dalam proses *pulverizing* batubara. HGI disimbolkan dengan °H, semakin kecil nilai HGI berarti semakin susah batubara ter-*grinding*. Gambar 2.2. berikut ini dapat digunakan untuk menentukan nilai HGI pada *pulveriser mill*.



Gambar 2.2. Nilai HGI pada coal pulveriser mill Tipe MPS-89
(Storm Technologies Inc, 2010)

Secara umum, nilai HGI untuk *coal pulveriser mill* adalah 50 ~55, untuk ukuran partikel 75µm.

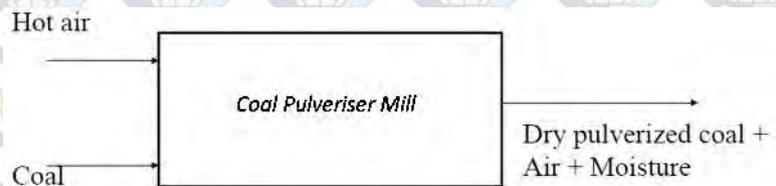
2.2. Balance Energy Coal Pulveriser Mill

Balance energi sederhana pada *coal pulveriser mill* ditunjukkan pada gambar 2.3 Untuk menghitung kesetimbangan energi dari *coal pulveriser mill*, beberapa parameter berikut harus diketahui:

- Temperatur udara primer yang masuk ke *coal pulveriser mill*
- Primary air/fuel ratio
- Fuel burn rate



- d. Temperatur batubara yang masuk ke *coal pulveriser mill*
- e. *Moisture* batubara yang masuk ke *coal pulveriser mill*
- f. *Moisture* batubara yang keluar dari *coal pulveriser mill*
- g. *Mill Outlet Temperature*
- h. *Minimum acceptable MOT*



Gambar 2.3. Balance energi di coal pulveriser mill

Berdasarkan gambar 2.3, perhitungan sederhana kesetimbangan energi di *coal pulveriser mill* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{coal} \quad (2.3)$$

$$\dot{Q}_{coal} = \dot{m}_c \times (T_o - T_{i,c}) \times C_{p,c} \quad (2.4)$$

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_a \times (T_o - T_{i,a}) \times C_{p,a} \quad (2.5)$$

Di mana: \dot{Q}_{air} = *sensible heat available in the mill inlet air*

\dot{Q}_{coal} = *sensible heat available in the coal inlet*

\dot{m}_a = *flowrate udara primer yang masuk ke mill (kg/s)*

\dot{m}_c = *coal flowrate yang masuk ke mill (kg/s)*

$T_{i,a}$ = *temperatur udara primer masuk ke mill (°K)*

$T_{i,c}$ = *temperatur coal masuk ke mill (°K)*

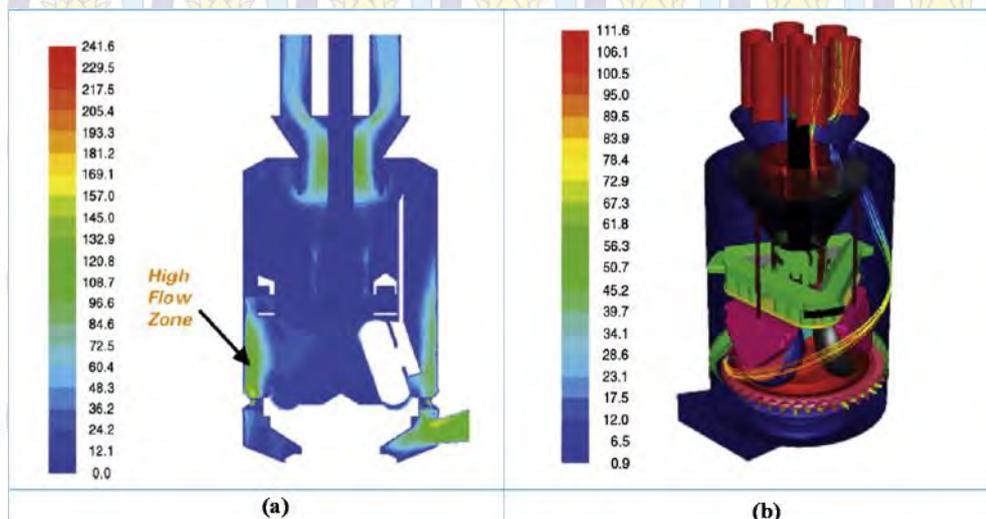
T_{amb} = *temperatur udara di lingkungan sekitar mill (°K)*

T_o = *temperatur fluida keluar dari mill / MOT (°K)*

Coal pulveriser mill ini telah banyak dijadikan sebagai tema penelitian dalam jurnal termasuk diantaranya yang melakukan pemodelan dengan

menggunakan CFD. Beberapa peneliti yang pernah melakukan pemodelan *coal pulveriser mill* dalam penelitiannya adalah sebagai berikut:

Bhambare dkk (2010) melakukan pemodelan *moisture evaporation* di dalam *coal pulveriser mill* dengan menggunakan CFD. Dalam simulasinya, dia menentukan injeksi partikel batubara dari *bowl (grinding table)*. Persebaran partikel injeksinya dihitung menggunakan distribusi distribusi *Rosin-Rammler*. *Bowl* dan *grinding* dirotasikan dengan kecepatan 20 rpm. Untuk memodelkan *coal flow*, dia menggunakan *coupled discrete phase model (DPM)* pendekatan *Eularian-Lagrangian* di mana partikel batubara dianggap sebagai group. Gaya interaksi antara gas dan partikel batubara diperhatikan dalam simulasinya, akan tetapi interaksi antar partikel diabaikan. Dia menentukan inisiasi awal terjadinya vaporasi pada partikel batubara terjadi pada temperatur vaporasi air. Laju vaporasi dihitung berdasarkan gradien dari konsentrasi vaporasi antara permukaan *droplet* dengan *bulk gas*. Pada gambar 2.4. menunjukkan *velocity magnitude* di dalam *coal pulveriser mill* yang dihasilkan.



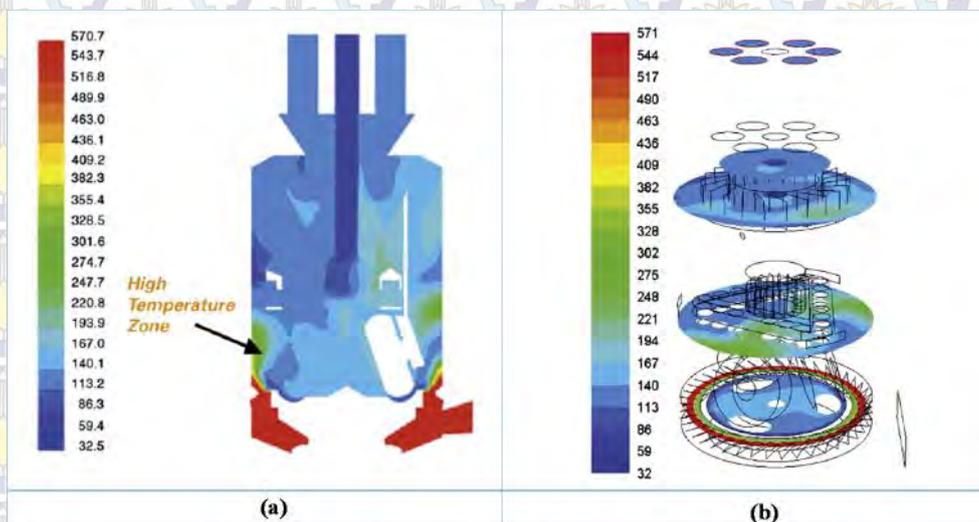
Gambar 2.4. Velocity magnitude hasil simulasi penelitian Bhambare dkk
(a) Contour of velocity magnitude (ft/s) dan (b) Particle velocity track (ft/s)
(Bhambaree dkk, 2010)

Dari penelitian Bhambaree dkk ini didapatkan bahwa *coal drying* yang menghasilkan evaporasi *moisture* akan menyebabkan penurunan temperatur udara primer dan mengubah komposisinya, selain itu *flow-rate* udara primer

yang masuk ke dalam *pulveriser mill* juga mengalami perubahan. Hasil dari simulasinya menunjukkan bahwa distribusi *velocity* di dalam *pulveriser mill* adan *non-uniform*, dan zona dengan *velocity* tertinggi ada di sekitan *throat*. Hal ini akan berdampak pada terbentuknya *non-uniform* distribusi temperatur di dalam *pulveriser mill*. *Velocity* yang *uniform* di daerah *throat* akan menyebabkan distribusi *air-coal flow* di pipa *outlet* menjadi *uniform*.

Pada gambar 2.4.(a), Bhambaree dkk menunjukkan penampang vertikal dari plot kecepatan udara primer mulai dari *duct*. Kecepatan udara primer turun akibat perbesaran area di dalam *body* (dari *vane* menuju *classifier*). Sesaat setelah melewati *vane*, terjadi zona kecepatan tinggi yang letaknya berseberangan dengan posisi *duct*. Distribusi kecepatan sesaat setelah melewati *throat* dan pada seluruh *body* berbentuk *non-uniform* yang menyebabkan distribusi kecepatan di dalam pipa *outlet* juga *non-uniform*.

Pada gambar 2.4.(b). menunjukkan *velocity magnitude* untuk partikel batubara yang berdiameter 58 μm . Partikel *fine* dengan ukuran ini sangat mudah terbawa oleh aliran udara menuju *classifier* sampai keluar mill. Gambar 2.5. menunjukkan distribusi temperatur di dalam *coal pulveriser mill*.



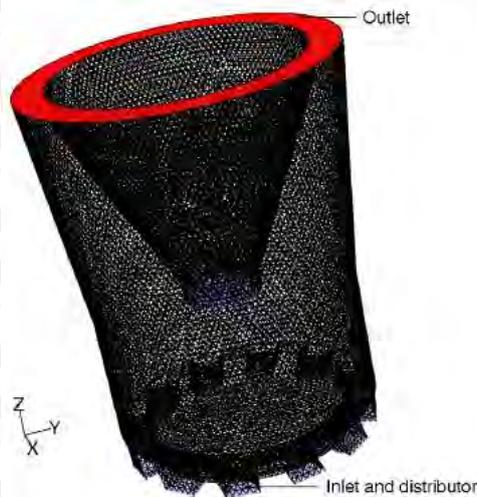
Gambar 2.5. Distribusi temperatur hasil simulasi penelitian Bhambaree dkk (a) penampang vertikal (°F) dan (b) Penampang melintang elevasi tertentu (°F) (Bhambaree dkk, 2010)



Terlihat terbentuk zona-zona temperatur tinggi yang muncul pada daerah yang fluidanya murni udara atau partikel batubaranya sedikit. Zona ini terdapat pada area di bawah bowl, di mana partikel batubara jarang ada. Zona temperatur tinggi lainnya adalah zona throat di mana partikel batubara dari bowl masih belum banyak mencampur. Hal ini menyebabkan distribusi temperatur di dalam *coal pulveriser mill* bersifat *non-uniform*. Temperatur outlet juga *non-uniform* dengan rata-rata temperaturnya 127°F. *Moisture content* pada outlet mill rata-rata sekitar 7%.

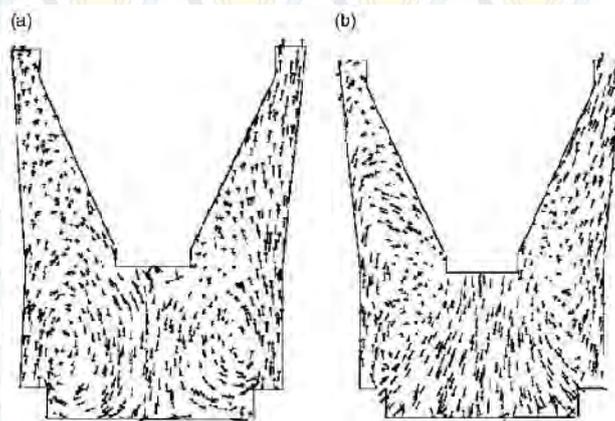
Vuthaluru dkk (2005) melakukan simulasi aliran fluida di dalam mill dengan menggunakan pendekatan *granular eulerian-eulerian* atau *eulerian-Lagrangian*. Model turbulen yang digunakan adalah model *k-ε* untuk *individual phase*. *Reynolds number* yang digunakan berkisar antara 50.000 sampai dengan 100.000. Vuthaluru melakukan simulasi untuk dua ukuran partikel batubara, yaitu 100 μm dan 500 μm. Diasumsikan bahwa *turbulent intensity* dan *length scales* dari *airflow* ditunjukkan pada inlet. Maksimum residual untuk tiap *scalar mass, momentum, turbulence intensity* dan *length scales* tercapai pada nilai 1e-04. *Flowrate* udara yang digunakan dalam simulasi Vuthaluru adalah 35 m³/s dan *flowrate* batubara adalah 2.8 kg/s untuk tiap ukuran partikel.

Gambar 2.6 menunjukkan hasil *meshing* model 3D *pulveriser* yang digunakan oleh Vuthaluru. Jumlah *node* pada model *pulveriser* yang dibuat oleh Vuthaluru, adalah 73.663 *nodes* dan 387.553 *cell* dengan *meshing* tipe *TGrid*.



Gambar 2.6. 3D Model dan mesh pulverizer Vuthaluru
(Vuthaluru dkk, 2005)

Hasil yang diperoleh dari simulasi Vuthaluru adalah aliran di dalam *coal pulveriser mill* adalah asimetris yang disebabkan karena sudut kemiringan *vane-wheel*. Daerah dengan *velocity* paling tinggi terdapat di sekitar keluaran *pulverizer*, hal ini mengindikasikan bahwa kemungkinan partikel batubara ikut terbawa di sekitar *wall surface*. Ukuran partikel mempengaruhi *pathline* di dalam *pulveriser*. Gambar 2.7 menunjukkan *velocity vector* untuk dua ukuran partikel batubara yang digunakan dalam simulasi Vuthaluru.



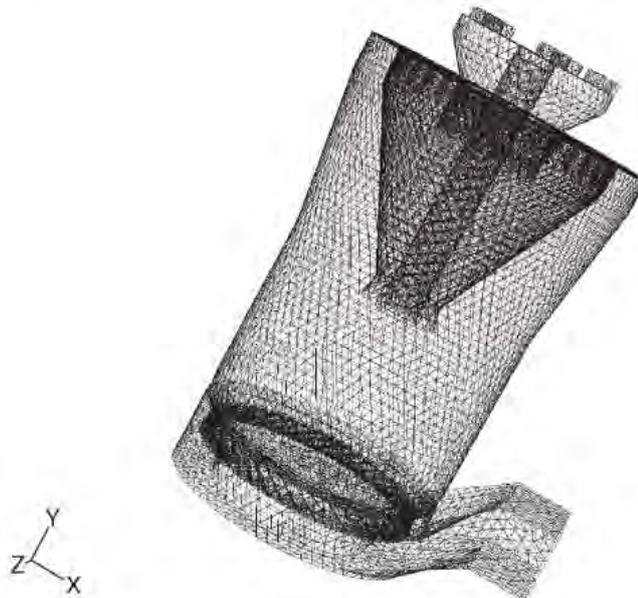
Gambar 2.7. Coal particle velocity vector pada simulasi Vuthaluru untuk partikel batubara ukuran (a) $100 \mu\text{m}$ dan (b) $500 \mu\text{m}$
(Vuthaluru dkk, 2005)

Hasil dari simulasi vuthaluru ini diperoleh bahwa partikel berukuran $100 \mu\text{m}$ akan mengikuti *pathline* dari udara, sehingga akan banyak partikel batubara



yang ikut terbawa oleh udara tanpa melewati daerah *grinding*. Sedangkan partikel berukuran 500 μm akan cenderung menyimpang dari *pathline* udara. Adanya pengaruh gravitasi, *velocity vector* di daerah masuknya solid banyak yang mengarah ke bawah, dan muncul pattern berupa *circular* di sisi kanan dan kiri yang dapat menyebabkan *particle carryover* oleh udara kemungkinan kecil terjadi.

Vuthaluru dkk (2006) melakukan penelitian kembali mengenai *coal pulveriser mill* untuk mengetahui *velocity pattern* yang terjadi di sekitar *vane-wheel*. Simulasi dilakukan dengan pendekatan *Eulerian-Lagrangian*. *Boundary condition* untuk inlet digunakan *velocity inlet* dan untuk *outlet* digunakan tipe *outflow*. Inputan yang digunakan adalah *static* dan *total pressure*, *velocity direction*, *turbulence velocity* dan *hydraulic diameter*. *Meshing* yang digunakan pada 3D model *pulverizer* pada gambar 2.8 adalah tipe *tetrahedral*, *triangular* dan *hexahedral*, menghasilkan 298.000 *cells*.

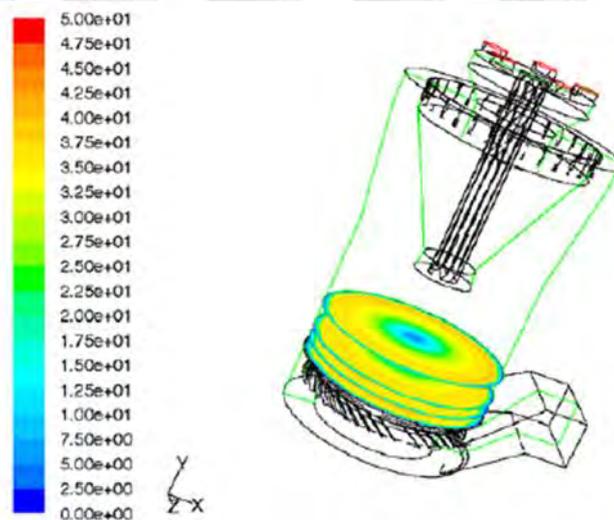


Gambar 2.8. 3D Model dan mesh pulverizer
(Vuthaluru dkk, 2006)

Dengan mengasumsikan aliran di dalam *pulveriser mill* adalah *fully developed*, digunakan model turbulen $k-\epsilon$. Turbulen intensity dan hidrolis diameter dihitung berdasarkan *mass flow rate* dan diameter pipa *inlet*. Untuk *numerical solver* digunakan *Segregated solver*. *SIMPLE algorithm* digunakan

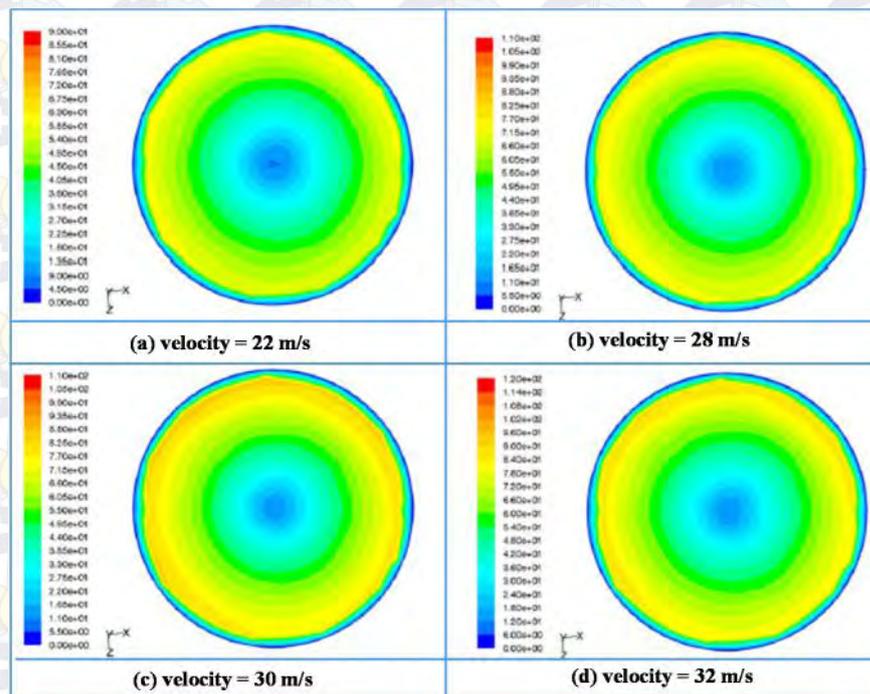
untuk *pressure* dan *turbulen quantity*. Aliran fluida adalah *incompressible* dan *steady state*. Maksimum residual untuk tiap *scalar mass*, *momentum*, *turbulence intensity* dan *length scales* tercapai pada nilai $1e-04$.

Hasil simulasi Vuthaluru seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9 menunjukkan bahwa *velocity* memiliki nilai tertinggi menuju sebelah kiri *inlet* dan sementara pada *disc 4* dapat terlihat distribusi *velocity* nya lebih *uniform*.



Gambar 2.9. Outline of geometry along with cross section of interest
[Disc 1 (2.26 m/h from base), Disc 4 (1.21 m), Vanes (0.951 m)]
(Vuthaluru dkk, 2006)

Dari hasil simulasi Vuthaluru yang ditunjukkan pada gambar 2.10 menunjukkan bahwa *velocity* udara memiliki peranan yang sangat signifikan terhadap medan aliran yang terbentuk. Semakin tinggi *velocity* udara yang dimasukkan maka bentuk aliran juga akan berubah khususnya di sekitar *wall mill* dan di atas *vane*.



Gambar 2.10. Pengaruh variasi seting velocity udara untuk elevasi $y=2.26$ (Vuthaluru dkk, 2006)

2.3. Karakteristik Batubara

Berdasarkan sistim *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D388, klasifikasi batubara dibagi menjadi empat grup. Dalam masing-masing grup dibagi lagi menjadi beberapa kelas berdasarkan kandungan *fixed carbon* dan *volatile matter*, untuk batubara *rank* tinggi dan berdasarkan *heating value* (dipengaruhi oleh kandungan *moisture*) untuk batubara *rank* rendah. (Lihat tabel 2.1)



Tabel 2.1. Klasifikasi Batubara menurut ASTM

Class/Group	Fixed Carbon ^a (%)	Volatile Matter ^b (%)	Heating Value ^b (Btu/lb)
Anthracitic			
Metaanthracite	>98	<2	
Anthracite	92-98	2-8	
Semianthracite	86-92	8-14	
Bituminous			
Low volatile	78-86	14-22	
Medium volatile	69-78	22-31	
High volatile A	<69	>31	>14,000
High volatile B			13,000-14,000
High volatile C			10,500-13,000 ^c
Subbituminous			
Subbituminous A			10,500-11,500 ^c
Subbituminous B			9,500-10,500
Subbituminous C			8,300-9,500
Lignitic			
Lignite A			6,300-8,300
Lignite B			<6,300

Propertis batubara secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. **Moisture**. Merupakan kandungan air yang terdapat di dalam batubara. *moisture* yang terkandung di dalam batubara dalam terjadi karena hal-hal berikut:
 - **Surface moisture**, air tertahan pada permukaan butiran batubara
 - **Hydroscopic moisture**, air tertahan oleh aksi kapiler pada retakan mikro di partikel batubara.
 - **Decomposition moisture**, air tertahan di dalam senyawa organik pembentuk batubara.
 - **Mineral moisture**, air yang merupakan bagian dari stuktur kristal dari *hydrous silicates*.

Moisture yang terkandung di dalam batubara terbagi menjadi tiga, yaitu:

- a. **Free Moisture (FM)**, merupakan jumlah kandungan air batubara yang diperoleh dari penyerapan terhadap lingkungan sekitar.
- b. **Inherent Moisture (IM)**, merupakan kandungan air batubara yang diperoleh sejak awal pembentukan batubara.c
- c. **Total Moisture (TM)**, merupakan jumlah keseluruhan kandungan air batubara gabungan antara FM dan IM.



2. **Volatile Matter (VM)**. Merupakan kandungan batubara selain *moisture* yang dapat dilepaskan pada temperature tinggi dalam kondisi kurangnya udara. *Volatile matter* ini terbentuk dari rantai *hydrocarbons* dan *sulfur*. Semakin tinggi kandungan *volatile matter* di dalam batubara maka semakin mudah batubara terbakar.
3. **Ash**, merupakan kandungan batubara yang tidak tersisa setelah batubara terbakar. *Ash* menunjukkan jumlah mineral yang terkandung setelah karbon, oksigen, sulfur dan air hilang akibat proses pembakaran.
4. **Fixed Carbon (FC)**, merupakan kandungan karbon yang terdapat pada material yang masih tertinggal setelah *volatile material* dihilangkan akibat proses pembakaran. *Fixed carbon* ini berbeda dengan kandungan karbon *ultimate* yang terdapat di batubara, karena sebagian karbon ikut terbakar bersama *volatile mater*. *Fixed carbon* digunakan untuk memperkirakan jumlah *coke* yang akan dihasilkan dari *sample* batubara. *Fixed carbon* diperoleh dengan cara memisahkan berat *volatile*, yang diperoleh dari hasil uji *volatil*, dari berat awal *sample* batubara.
5. **Caloric Value (Heating Value)**, merupakan jumlah panas yang terlepas ketika batubara terbakar. Dalam satuan SI, nilai kalor batubara ini disimbolkan dengan kilo joule per kilogram (kJ/kg) atau kilo kalori per kilogram (kCal/kg). Nilai kalor ini menunjukkan jumlah batubara yang dibutuhkan dalam proses pembakaran di PLTU, semakin tinggi nilai kalor suatu batubara maka semakin sedikit jumlah batubara yang dibutuhkan untuk membangkitkan 1 kWh listrik
 - **Gross Calorific Value** atau disebut juga *higher heating value* (HHV) merupakan total panas yang dilepaskan ketika batubara terbakar.
 - **Nett Calorific Value** atau *Lower Heating Value* (LHV) merupakan energi panas yang tersedia setelah mengurangi rugi-rugi akibat kandungan *moisture*.



Properties batubara yang disebutkan di atas diperoleh dari analisa laboratorium. Ada dua jenis analisa yang dapat dilakukan terhadap batubara ini, yaitu:

1. *Proximate Analysis*.

Tujuan dari analisa ini adalah untuk menentukan jumlah FC, VM, *moisture* dan abu yang terkandung di dalam batubara. Variabel-variabel tersebut diukur dalam persen berat (wt.%) dan dihitung dalam beberapa *base* yang berbeda

- a. *As-Received base* (AR). Perhitungan berdasarkan semua variabel yang ada dan menggunakan berat total sebagai dasar pengukuran
- b. *Air-Dried base* (ADB). Perhitungan dengan menghilangkan unsur *moisture* selain IM
- c. *Dry base* (DB). Perhitungan dengan menghilangkan semua unsur *moisture* yang terkandung di dalam batubara
- d. *Dry, ash free base* (DAF). Perhitungan dengan menghilangkan semua kandungan *moisture* dan unsur abu
- e. *Dry, mineral-matter-free base* (DMMF). Perhitungan dengan menghilangkan unsur *moisture* dan *mineral matters* yang terkandung di dalam batubara

2. *Ultimate Analysis*

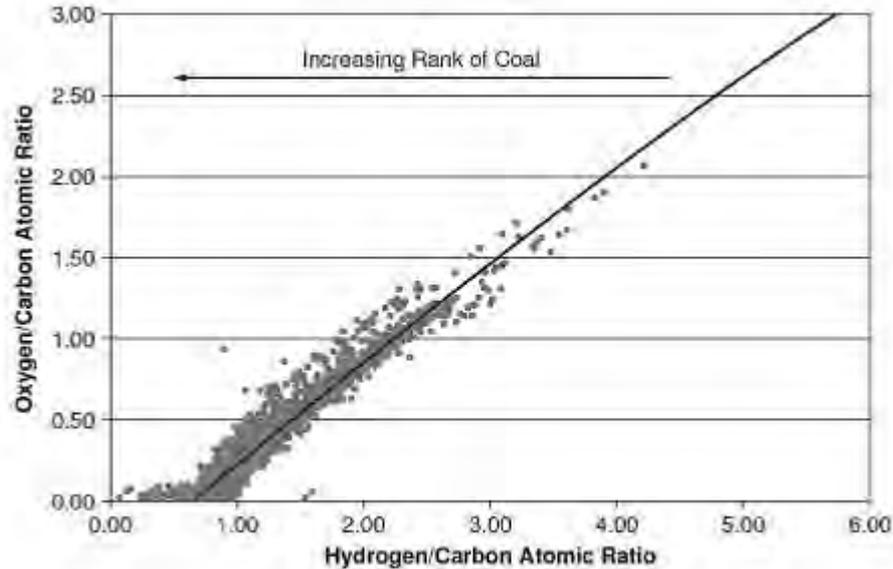
Tujuan dari analisa ultimat ini adalah untuk menentukan unsur pokok batubara dalam bentuk unsur kimia dasar yaitu *carbon* (C), *hydrogen* (H), *Oxygen* (O), *Sulfur* (S) dan elemen-elemen lain yang terdapat dalam *sample* batubara yang dianalisa.

Variabel-variabel ini diukur dalam persen berat (%wt) dan dihitung dengan *base-base* yang telah disebutkan di atas.

Batubara kalori rendah cenderung memiliki kandungan logam alkali lebih banyak sehingga mudah terjadi *slagging* dan *fouling*. Hal lainnya yang perlu diperhatikan untuk karakteristik batubara adalah bahwa semakin tinggi *rank* batubara maka semakin berkurang kandungan oksigen di dalamnya serta meningkatnya kandungan karbon. Pada gambar 2.11 menunjukkan rasio atom



hydrogen/carbon terhadap oxygen/carbon yang dipengaruhi oleh rank batubara.



Gambar 2.11. Coal rank ratio as a function of hydrogen/carbon and oxygen/carbon atomic ratio
(Combustion Engineering Issues for Solid Fuel System, 2008)

Batubara yang digunakan dalam penelitian ini adalah batubara tipe *low rank* (LRC) atau batubara *subbituminus* yang memiliki nilai kalori (HHV) 4.200 kCal/kg

Setelah melewati proses pengeringan di dalam *pulveriser mill*, diharapkan terjadi kenaikan nilai kalor batubara yang akan diumpangkan ke *boiler*. Perhitungan nilai kalor berdasarkan standart ASTM D 3286 adalah:

$$HHV_{db} = \left(\frac{100}{100 - IM} \right) \times HHV_{adb} \quad (2.6)$$

$$HHV_{ar} = \left(\frac{100 - TM}{100} \right) \times HHV_{db} \quad (2.7)$$

Substitusi:

$$HHV_{ar} = \left(\frac{100 - TM}{100} \right) \times \left(\frac{100}{100 - IM} \right) \times HHV_{adb} \quad (2.8)$$

Di mana:

HHV_{db} = nilai kalor saat tidak ada *moisture* di batubara (kCal/kg).



HHV_{adb} = nilai kalor saat masih ada *inherent moisture*, IM (kCal/kg).

HHV_{ar} = nilai kalor saat ada *inherent* dan *surface moisture* (kCal/kg).

Perhitungan nilai kalor setelah proses pengeringan di dalam *pulveriser mill* dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} HHV'_{ar} &= \left(\frac{100 - TM'}{100} \right) \times \left(\frac{100}{100 - IM} \right) \times HHV_{adb} \\ &= \left(\frac{100 - (TM - \Delta M)}{100} \right) \times \left(\frac{100}{100 - IM} \right) \times HHV_{adb} \\ &= \left[\left(\frac{100 - TM}{100} \right) \times \left(\frac{100}{100 - IM} \right) \times HHV_{adb} \right] \\ &\quad + \left[\left(\frac{\Delta M}{100} \right) \times \left(\frac{100}{100 - IM} \right) \times HHV_{adb} \right] \\ HHV'_{ar} &= HHV_{ar} + \left[\left(\frac{\Delta M}{100} \right) \times \left(\frac{100}{100 - IM} \right) \times HHV_{adb} \right] \quad (2.9) \end{aligned}$$

di mana:

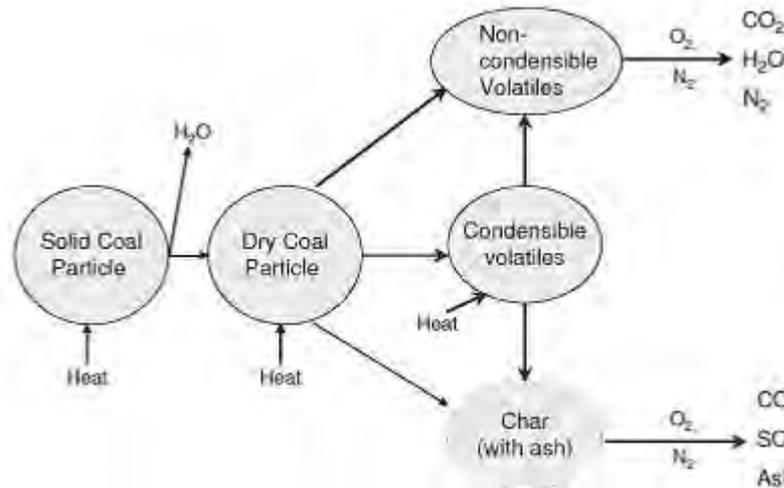
HHV'_{ar} = *high heating value after drying* (kCal/kg)

TM' = *total moisture after drying*

ΔM = Selisih kandungan *moisture* sebelum dan sesudah *drying*.

2.4. *Spontaneous Combustion di Dalam Coal Pulveriser Mill*

Mekanisme terjadinya proses pembakaran disebabkan karena adanya beberapa proses meliputi *initial*, serta proses pemanasan dan pengeringan dari partikel. Butiran batubara yang telah dikeringkan akan mengalami proses *devolatilize*, pelepasan *volatile mater*. Pada gambar 2.12 ditunjukkan bagaimana mekanisme pembakaran terjadi.



Gambar 2.12. Mekanisme terjadinya pembakaran
(*Combustion Engineering Issues for Solid Fuel System, 2008*)

Pada saat batubara diangkat oleh udara primer menuju area separasi (*separator body*) terjadi juga proses pengeringan butiran batubara oleh udara primer. Proses pengeringan ini akan membuang/mengurangi kandungan *moisture* di dalam butiran batubara sehingga batubara siap dibakar.

Penelitian yang terkait dengan permasalahan batubara ini pernah dilakukan oleh diantaranya:

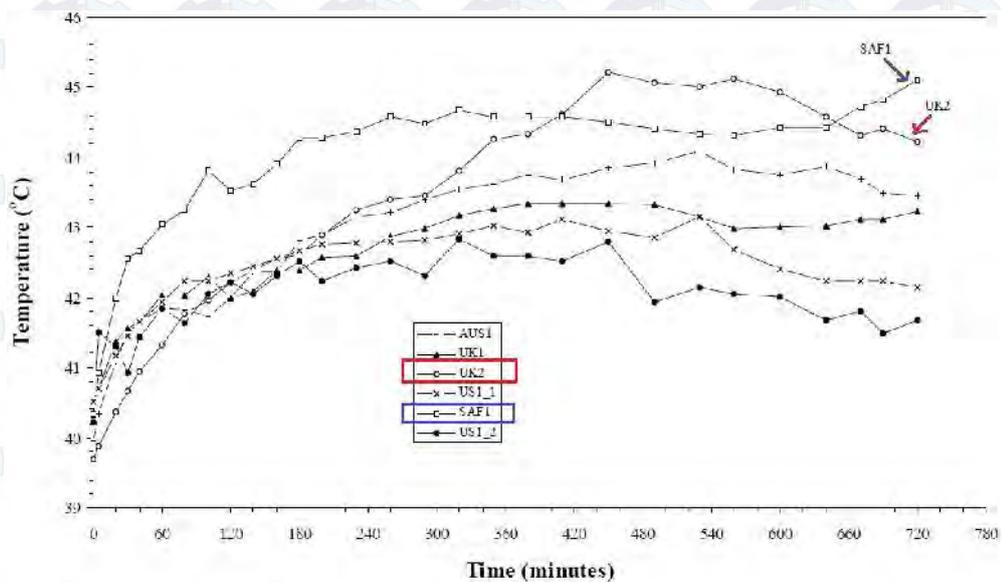
Sujanti (1999) dalam melakukan penelitiannya tentang *spontaneous combustion* menggunakan teknik reaksi *isothermal*, *adiabatik* dan *wire-mesh* dengan metode *steady-state* dan *unsteady-state*. Kecenderungan batubara untuk terbakar sendiri (*self-combustion*) dibatasi dengan temperatur kritis batubara, jika lebih dari itu maka batubara memiliki kecenderungan ter-*self combustion*. Hasil penelitiannya dengan menggunakan reaktor *isothermal* menunjukkan bahwa terdapat nilai optimum *flow rate* udara primer yang dapat menyebabkan *self combustion* pada batubara. Pada penelitian dengan menggunakan reaktor *adiabatik* menunjukkan bahwa *air flow rate* tidak berpengaruh terhadap temperatur *ambient* batubara, akan tetapi pada durasi terjadi *ignition* awal. Semakin tinggi *air flow rate* maka semakin cepat pula terjadi *ignition* awal. Diperoleh pula bahwa temperatur *ambient* yang tinggi serta lingkungan yang lembab dapat mengakselerasi terjadinya *self*



combustion. Ukuran partikel batubara juga berpengaruh terhadap *self-heating* pada batubara. Semakin kecil ukuran partikel batubara maka temperatur *ambient* akan kecil juga sehingga resiko terjadinya *self-combustion* semakin tinggi. Dari penelitiannya, diketahui bahwa temperatur kritis *ambient* untuk tiap batubara adalah bervariasi berdasarkan propertis batubara itu sendiri serta kondisi lingkungan.

Ren dkk (1999) menggunakan 18 *sample* batubara dalam penelitiannya. Tiap *sample* yang digunakan, diuji pada *temperatur initial* 40°C. Faktor-faktor yang dipertimbangkan dalam penelitian Ren adalah *initial temperature*, *moisture content* dan *particle size*. Untuk mengkondisikan temperatur yang sesuai dengan kondisi di dalam *coal pulveriser mill*, Ren menguji beberapa *sample* (SAF1, SAM2 dan UK2) pada temperatur 60°C dan melakukan variasi temperatur di sekitar angka tersebut. Hasilnya diperoleh bahwa pada *initial temperature* yang tinggi, batubara lebih cenderung mudah mengalami *self combustion*.

Ren menentukan tingkat resiko batubara untuk terjadi *spontaneous combustion* berdasarkan *Initial Rate of Heating* (IRH) dan *Total Temperature Rise* (TTR), seperti ditunjukkan pada gambar 2.13. Pada gambar 2.13 terlihat bahwa untuk *sample* UK2 dan SAF1 memiliki tingkat resiko tinggi untuk terjadi *spontaneous combustion*. Nilai IRH dan TTR pada UK2 adalah 1,63 °C/h dan 5.61 °C. Sedangkan pada SAM2 adalah 3.20°C/h dan 4.19 °C.



Gambar 2.13. Grafik temperatur batubara ter-self combustion (Ren dkk, 1999)

Dalam penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur udara primer ini, menggunakan batubara jenis *low rank*. Batubara jenis ini mengandung banyak *moisture* di dalamnya. Sehingga untuk mendapatkan batubara kering yang siap dibakar, diperlukan udara pemanas dengan temperatur yang cukup tinggi untuk proses pengeringan.

Karakteristik batubara sangat berpengaruh terhadap permasalahan *spontaneous combustion* di dalam *pulveriser mill*. Batubara kalori rendah umumnya sangat mudah terbakar di dalam *coal pulveriser mill*. Kandungan *volatile matter* yang tinggi di dalam batubara dapat menyebabkan *initial ignition* di dalam *coal pulveriser mill*. Kandungan *moisture* yang tinggi pada batubara akan membutuhkan temperatur udara primer yang masuk ke dalam *coal pulveriser mill* tinggi pula sehingga dapat memicu terjadinya *ignition* batubara di dalam mill.

Beberapa faktor utama yang dapat mempengaruhi terjadinya *spontaneous combustion* adalah sebagai berikut:

1. *Coal rank*. Semakin rendah *coal rank* maka semakin tinggi kemungkinan *spontaneous combustion* terjadi. Daftar lengkap mengenai *coal rank* inidapat dilihat pada tabel 2.1.



2. *Air flow rate*. Jika *air flow rate* terlalu tinggi, maka akan meningkatkan konsentrasi oksigen di permukaan *coal* sehingga memperbesar pula kemungkinan terjadinya *spontaneous combustion*.
3. *Coal particle size*. Semakin kecil *coal particle* maka semakin besar area pada permukaan *coal* dan mempermudah terjadinya *spontaneous combustion*.
4. *Moisture content*. Untuk *low rank coal*, laju *heat generation* akibat proses penguapan *moisture* akan melebihi laju *heat generation* oleh reaksi oksidasi. Pada temperatur 65°C ($\pm 338^{\circ}\text{K}$) dan *moisture*-nya mencapai 25% dari nilai awalnya (*as received*), *coal* akan mudah terjadi *spontaneous combustion*. (Nugroho dan saleh)
5. Temperatur. Semakin tinggi temperatur maka laju reaksi antara batubara dengan oksigen akan semakin tinggi.

Pada beberapa kasus yang pernah terjadi, *spontaneous combustion* di dalam *pulveriser mill* terjadi di area bawah *bowl*. Area di bawah *bowl* ini merupakan area dengan temperatur tinggi karena merupakan area masuknya udara primer ke dalam *coal pulveriser mill*. Batubara masuk ke dalam *coal pulveriser mill* melewati *inlet pipe* akan langsung jatuh tepat di tengah *bowl*. *Bowl* pada *coal pulveriser mill* bekerja memutar dengan kecepatan tertentu. Perputaran *bowl* inilah yang mengarahkan tumpahan batubara dari tengah akan bergerak ke tepian di tepat di bawah *roller grinder*. Suplai batubara yang secara kontinyu dari *inlet pipe* akan menyebabkan pada satu waktu tertentu area *bowl* penuh dengan batubara *raw* maupun *fine*. Hal inilah yang menyebabkan batubara ada yang tertumpah dari *bowl* dan menumpuk di *pyrite*. Akumulasi dari debris atau batubara di dalam *pulveriser* akan meningkatkan kemungkinan terjadinya kebakaran mill. Kondisi di bawah *bowl* ini memiliki temperatur dan rasio udara/batubara sangat tinggi. Dengan temperatur yang sangat tinggi, maka batubara yang terakumulasi di daerah bawah *bowl* ini akan cepat *ter-drying* dan dengan kondisi tersebut rawan terjadi *spontaneous combustion* di daerah ini. Untuk mengantisipasinya, saluran buangan *pyrite* harus diperiksa secara berkala untuk memastikan bahwa material *reject* telah terbang dari



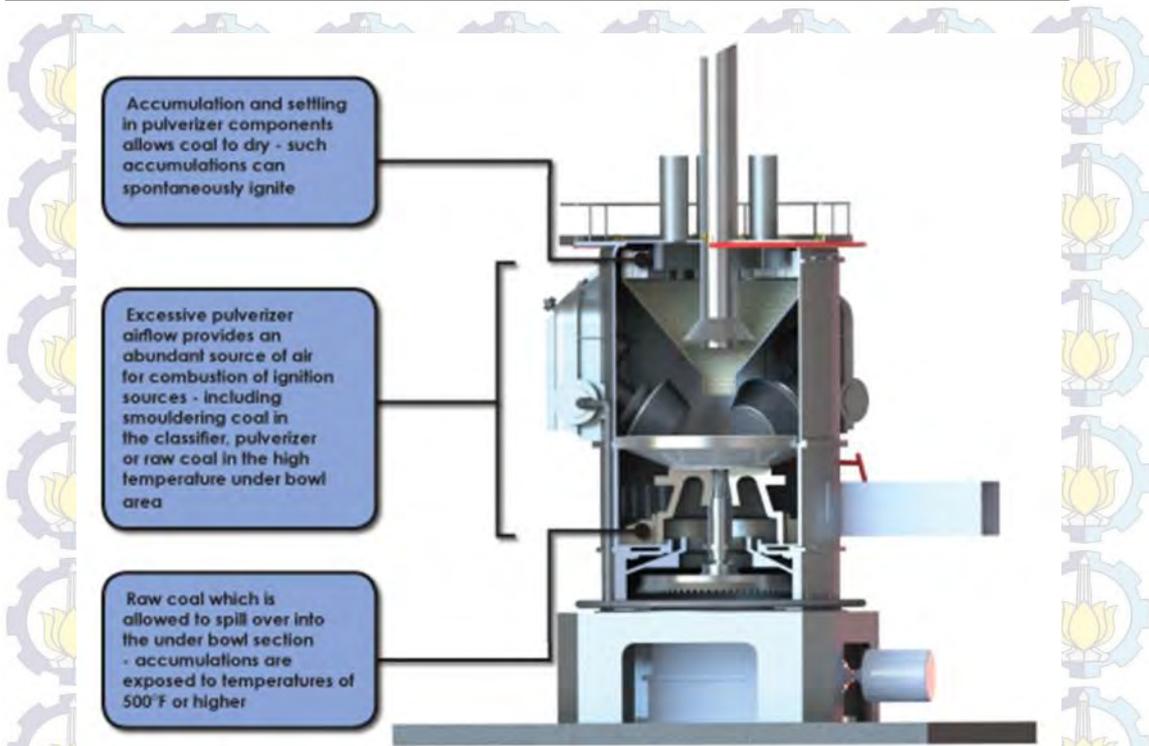
bawah bowl. Apabila saluran buangan *pyrite* ini terhambat akan berakibat debris menumpuk di area aliran masuknya udara primer.

Akumulasi atau penumpukan batubara di dalam *coal pulveriser mill* dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya *spontaneous combustion*. Kandungan *moisture* pada batubara yang menumpuk di satu area saja akan cepat terlepas ke udara sehingga area permukaan batubara akan langsung kontak dengan udara panas dan dapat menimbulkan percikan awal. Tingginya *flowrate* udara yang masuk akan menyediakan sumber panas pada batubara-batubara yang menumpuk di bagian dalam *coal pulveriser mill*. *Plugging* batubara ini sering didapati pada bagian *classifier*, di area bawah grinder dan area bawah *bowl*. Oleh sebab itu, sangat penting untuk menjaga kecepatan aliran udara agar penyerapan panas terjadi merata.

Hal-hal yang bisa dijadikan acuan terjadinya kebakaran di mill adalah sebagai berikut:

- Naiknya temperatur outlet mill di atas set-point
- Tercium sulfur akibat pembakaran batubara dari material *reject*
- Muncul percikan api dari *pyrite chut*.
- *Pulveriser housing* atau saluran menuju burner berwarna merah menyala

Untuk melakukan pencegahan terjadinya kebakaran di mill, perlu dipastikan bahwa aliran udara yang masuk ke dalam *pulveriser mill* mampu dijadikan sebagai alat transportasi batubara sehingga menjamin tidak ada batubara yang menumpuk di saluran keluaran mill. Dipastikan pula bahwa kondisi udara dijaga sedemikian rupa sehingga tidak menimbulkan *combustion* setelah berinteraksi dengan butiran batubara. *Ignition* awal dari terjadi *combustion* ini berupa pembakaran secara perlahan pada butiran batubara yang biasanya terjadi pada sekitar *classifier* atau di bawah area bowl. Gambar 2.14 menunjukkan beberapa penyebab umum terjadinya kebakaran di *pulveriser mill*.



Gambar 2.14. Sebab-sebab umum terjadinya kebakaran di Coal Pulveriser mill.
(Innovative Combustion Technologies, Inc)

Coal Drying Process

Proses *drying* pada batubara merupakan proses untuk menghilangkan kandungan air yang terdapat pada batubara dengan penguapan. Untuk menghilangkan kandungan *moisture* pada batubara, proses *drying* di dalam *coal pulveriser mill* adalah dengan memberi sumber panas dalam hal ini udara primer. Kenaikan temperatur akan menaikkan tekanan penguapan pada air. Pada saat tekanan penguapan ini melebihi tekanan parsial udara, maka proses penguapan air terjadi. Laju pengupuan *moisture content* pada batubara dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut ini:

1. Luas area permukaan partikel
2. Perbedaan temperatur antara partikel dan udara pengering
3. Perbedaan antara tekanan penguapan pada permukaan batubara dan tekanan parsial pada uap air di sistim
4. Volume dan laju kecepatan dari udara pengering



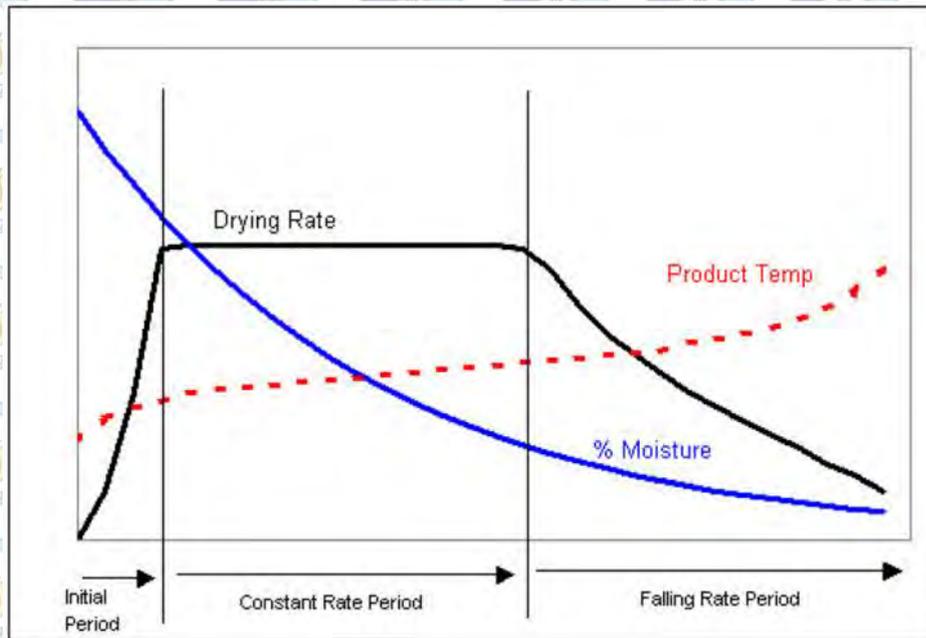
5. Perbedaan temperatur antara temperatur udara kering dan udara lembab pada udara pengering.
6. *Porosity* serta propertis batubara lainnya

Propertis batubara yang berperan penting dalam proses *drying* adalah *porosity*, panas spesifik, konduktifitas panas dan kandungan kimia pada permukaan batubara. *Porosity* pada batubara menentukan kenaikan temperatur relatif yang disebabkan oleh jumlah energi panas yang diserap oleh solid. Unsur kimia yang terdapat pada permukaan batubara akan menentukan derajat penurunan kandungan air pada permukaan batubara. Atau dengan kata lain material *hydrophobic* lebih mudah membuang kandungan air daripada material *hydrophilic*.

Proses *drying* pada batubara terbagi menjadi tiga fase, yaitu fase pertama atau disebut juga *initial period*, merupakan periode di mana panas sensibel ditransfer ke batubara dan kandungan *moisture*nya. Pada fase ini, batubara dipanaskan dari temperatur masuknya (*coal inlet temperature*) sampai ke temperatur penguapannya. Pada fase ini, laju penguapan akan meningkat cepat dan *free moisture* di dalam batubara akan dilepaskan.

Fase selanjutnya yaitu *constant-rate period*, pada fase ini permukaan batubara masih basah. Laju penguapan pada fase ini berlangsung konstan. Panas yang ditransfer dari udara panas nilainya sama dengan panas yang dilepas untuk penguapan air di permukaan batubara. Temperatur dari permukaan batubara akan mendekati temperatur kelembaban pada udara pengering. Sehingga pada fase ini, temperatur batubara tidak mengalami kenaikan yang signifikan.

Fase ketiga pada proses *drying* ini adalah *falling rate period*, yaitu ketika permukaan batubara mulai kering. Fase ini terjadi ketika *moisture* tidak dapat mempertahankan kondisi saturasi di permukaan batubara sehingga laju pengeringan akan menurun. Pada saat ini batubara memiliki peranan penting dalam menentukan laju pelepasan *moisture* ke udara. Ketiga periode pada proses *drying* ini ditunjukkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15. Grafik drying process secara umum
(Korte dan Mangena, 2004)

Proses *coal drying* di dalam *mill* akan menyebabkan temperatur *coal* turun serta *moisture content* di dalamnya berkurang sehingga temperatur udara akan turun. Persamaan energi untuk proses *coal drying* ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_{dry} + Q_{h,c} \quad (2.10)$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \times C_{p,a} \times (T_o - T_{i,a}) \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_{h,c} = \dot{m}_c \times (1 - M_i) \times (T_o - T_i) \times C_{p,c} \quad (2.12)$$

$$\dot{Q}_{dry} = \dot{m}_c \times (M_i - M_o) \times (C_{p,w} \times (100 - T_{amb}) + h_{fg}) \quad (2.13)$$

di mana:

\dot{Q}_a = panas yang terkandung dalam udara primer (kJ/s, Watt)

$\dot{Q}_{h,c}$ = panas yang terkandung dalam *coal* (kJ/s, Watt)

\dot{Q}_{dry} = panas yang dibutuhkan untuk proses *coal drying* (kJ/s, Watt)

\dot{m}_a = *flowrate* udara primer yang masuk ke *mill* (kg/s)



\dot{m}_c = coal flowrate yang masuk ke mill (kg/s)

$T_{i,a}$ = temperatur udara primer masuk ke mill ($^{\circ}\text{K}$)

$T_{i,c}$ = temperatur coal masuk ke mill ($^{\circ}\text{K}$)

T_{amb} = temperatur udara di lingkungan sekitar mill ($^{\circ}\text{K}$)

T_o = temperatur fluida keluar dari mill / MOT ($^{\circ}\text{K}$)

$C_{p,a}$ = heat capacity dari udara (kJ/kg.K) = 1.0063 kJ/kg.K

$C_{p,c}$ = heat capacity dari coal (kJ/kg.K) = 1.680 kJ/kg.K

$C_{p,w}$ = heat capacity dari air (kJ/kg.K) = 4.187 kJ/kg.K

h_{fg} = enthalpy fasa campuran pada $T=100^{\circ}\text{C}$ (kJ.kg) = 2260 kJ/kg

M_i = fraksi moisture di dalam coal masuk mill

M_o = fraksi moisture di dalam coal keluar mill

Pengaruh Kelembaban Udara

Kelembaban adalah konsentrasi uap air di udara, kandungan uap air bergantung pada temperatur, tekanan dan iklim. Istilah udara lembab mengacu pada campuran antara udara kering dan uap air di mana uap air diperlakukan sebagai komponen murni. Komposisi dari sebuah sample udara lembab tertentu dapat dideskripsikan dalam $Y@$ ra. Campuran dapat dituliskan dalam mol udara kering dan uap air yang terkandung atau dalam fraksi mol masing-masing. Komposisi juga dapat dinyatakan melalui *rasio kelembaban* (ω) yang didefinisikan sebagai rasio massa dari uap air (m_v) dengan massa dari udara kering (m_a).

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.14)$$

Rasio kelembaban biasa disebut juga kelembaban spesifik. (Moran dan Saphiro, 2004).



Rasio kelembaban dapat dituliskan dalam bentuk tekanan parsial (p) dan berat molekuler (M), sehingga persamaan 2.14 dapat dirubah sebagai berikut:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v p_v V / RT}{M_a p_a V / RT} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a} \quad (2.15)$$

Jika $P_a = p - p_v$ dan rasio berat molekuler air terhadap udara kering adalah 0,622, maka persamaan 2.15 dapat disederhanakan menjadi:

$$\omega = 0.622 \times \frac{p_v}{p - p_v} \quad (2.16)$$

Kandungan dari udara lembab dapat juga dituliskan dalam bentuk kelembaban relatif (ϕ), yang didefinisikan sebagai rasio fraksi mol dari uap air (y_v), dalam sebuah sample udara lembab fraksi mol ($y_{v,sat}$) dalam sebuah sample udara lembab jenuh pada temperatur dan tekanan campuran yang sama.

$$\phi = \frac{y_v}{y_{v,sat}} \quad (2.17)$$

Karena $p_v = y_v \cdot p$ dan $p_g = y_{v,sat} \cdot p$

Maka persamaan 2.17 menjadi:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} \quad (2.18)$$



BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi numerik menggunakan *software ANSYS Fluent 13.0* untuk analisa persebaran temperatur di dalam *coal pulveriser mill*. Untuk membuat model 3D *coal pulveriser mill* dilakukan dengan menggunakan *Gambit 2.4.6*. Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

3.1. Studi Literatur

Permasalahan yang dihadapi di PLTU Rembang terkait dengan pengoperasi *coal pulveriser mill* adalah ketidaksesuaian spesifikasi batubara yang digunakan. Kandungan *moisture* yang tinggi pada batubara kalori rendah harus diimbangi dengan temperatur udara primer yang tinggi untuk proses *drying* di dalam *coal pulveriser mill*. Batasan-batasan operasi pada *coal pulveriser mill* yang digunakan di PLTU Rembang pada saat ini adalah untuk batubara kalori menengah. Penentuan temperatur udara primer harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak menyebabkan batubara di dalam *coal pulveriser mill* ter-*self combustion*.

Untuk membantu dalam pemahaman dan analisa permasalahan yang ada, dilakukan studi literatur berkaitan dengan proses yang terjadi di dalam *coal pulveriser mill* serta permasalahan yang sering dialami pada *coal pulveriser mill*. Studi literatur diperoleh dari jurnal, *e-book*, *handbook*, laporan thesis dan *website*.

3.2. Pengumpulan Data Teknis dan Data Operasi

Untuk mendukung pelaksanaan penelitian, diperlukan adanya data aktual untuk acuan pemodelan dan simulasi dari sistim yang akan ditinjau. Data aktual yang digunakan berupa data geometri boiler, data teknis peralatan, data batubara yang digunakan dan data kondisi *pulveriser mill* pada



saat beroperasi. Data operasi *coal pulveriser mill* yang digunakan pada penelitian ini dituliskan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Data operasi coal pulveriser mill

Coal Pulveriser Mill	Merk	DongFang
	Type	HP963
	Rated Output	51.3 t/h
	Milling cup speed	33 rpm
	Coal fineness	200 mesh (74 μ m)
	Mill Outlet Temperature (MOT)	55°C ~ 65°C Trip: \geq 76°C
	Primary air flowrate	>55t/h
	Motor rating power	6.3 kV, 520 kW

Untuk batubara yang digunakan pada penelitian ini adalah batubara jenis kalori rendah dengan nilai kalor 4200 kCal/kg. Analisa *fineness* batubara menggunakan *screen* ukuran *sieve* standar U.S. Hasil analisa *fineness* batubara ini dituliskan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2. Analisa *fineness* batubara (output classifier)

Sieve no.	Micron (μm)	%Finer
30	595	25.31
200	74	74.69

Propertis batubara (*as received*) yang digunakan pada penelitian ini, dituliskan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3. Data propertis batubara

Coal Properties (as received)	Inlet coal pulveriser mill	Outlet coal pulveriser mill
Total Moisture	33,62%	21.42%
Inherent moisture	27.20%	9.20%
Ash content	3.51%	5.70%
Volatile matter	36.84%	46.27%
Fixed carbon	26.03%	38.83%

3.3. Pemodelan Geometri dan Meshing Menggunakan GAMBIT

Pada proses pemodelan dan simulasi dengan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 13 dan GAMBIT 2.4.6, terdapat tiga tahapan utama yang dilakukan, yaitu:



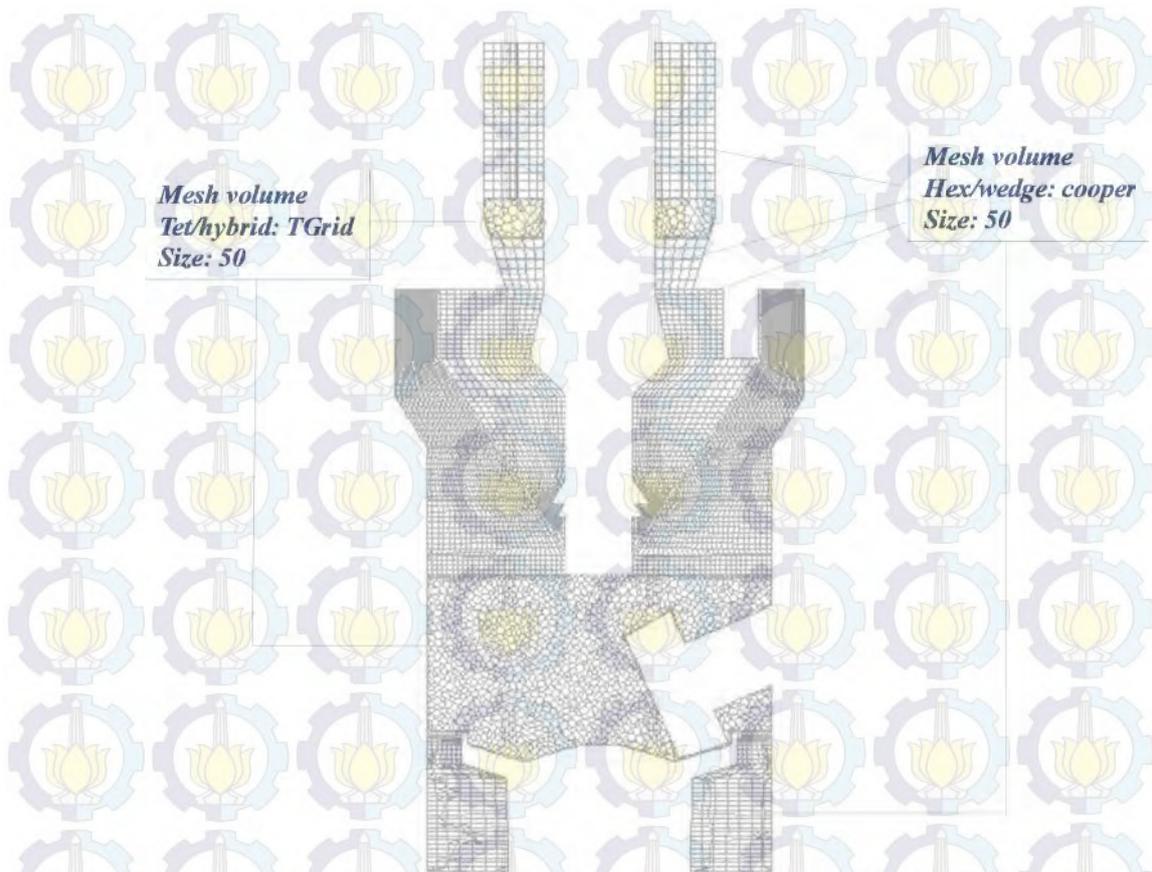
Blade vane wheel dan *classifier* dibuat dengan sudut kemiringan 45° arah sumbu x positif. Jarak antar *blade* dibuat selebar 9° arah rotasi sumbu y positif. Jumlah *blade vane wheel* dan *classifier* masing-masing ada 40 *blade*.

Body grinder merupakan volume *body pulveriser mill* yang sudah dikurangi dengan volume *grinder roll* sebanyak tiga buah, berjarak 120° arah rotasi sumbu y positif.

Meshing

Proses *meshing* untuk *pulveriser mill* adalah sebagai berikut:

1. Volume *vane wheel*
 - *Meshing face* sisi luar dengan *quad* : *map* dan spasi tipe *size:50*
 - *Meshing volume* dengan *hex/wedge* : *cooper* dan spasi tipe *size:50*
2. Volume *body grinder*
 - *Face* sisi atas (yang terkoneksi dengan *body5*) dibuat *guide* pada tiap *edge* dengan tipe *count:200* kemudian *meshing face* dengan *quad:map* dan spasi tipe *size:50*
 - *Meshing volume body grinder* dengan *tet/hybrid:TGrid* dan spasi tipe *size:50*
3. Volume *Body1* sampai dengan *Body5*, *Classifier*, *Cone1* sampai dengan *Cone5*
 - *Meshing face* sisi luar dengan *quad: map* spasi tipe *size:50*
 - *Meshing volume* dengan *hex/wedge* : *cooper* dan spasi tipe *size:50*
4. Volume atas *classifier* dan *oulet pipe* dilakukan dengan *tet/hybrid:TGrid* dan spasi tipe *size: 50*

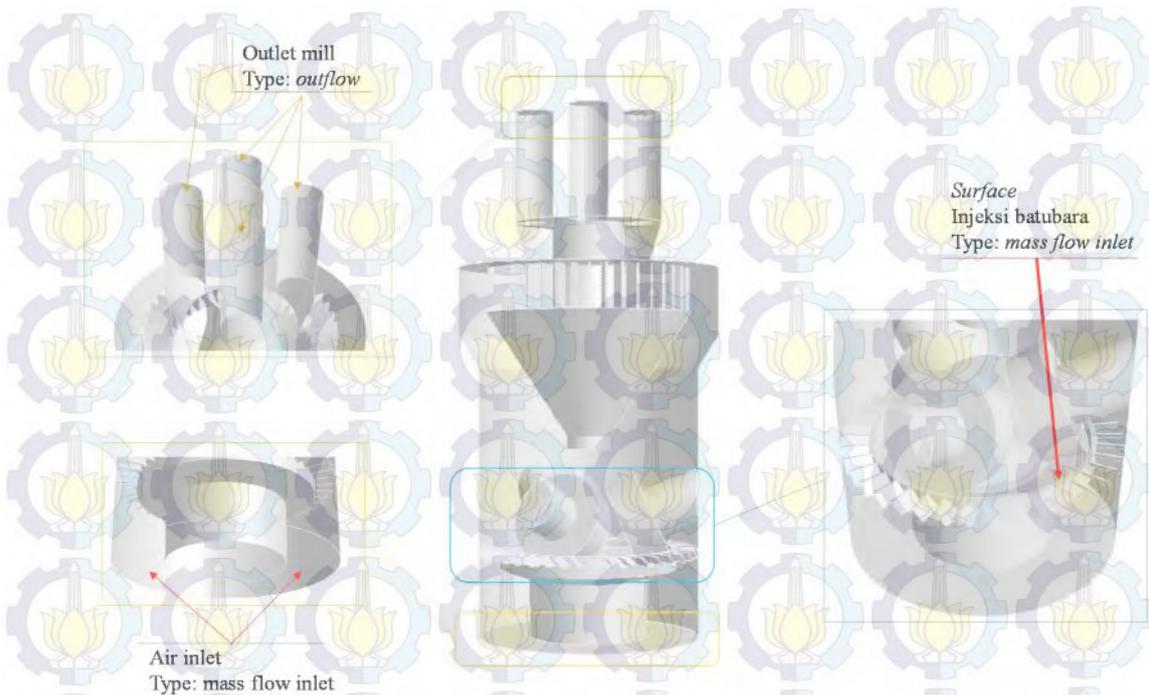


Gambar 3.2. Display meshing coal pulverizer mill

Total *node* dari *meshing coal pulveriser mill* pada gambar 3.2 adalah 1.342.833 *node*

3.3.2. Processing

Penentuan *domain* pemodelan terdiri dari *mass flow inlet* untuk *air inlet* dan *coal inlet*. Serta *pressure outlet* untuk *air+coal outlet*. Gambar 3.3 menunjukkan penentuan *domain* pemodelan *pulverizer mill*.



Gambar 3.3. Domain pemodelan pulverizer mill PLTU Rembang

▪ **General**

Mesh scale dalam unit m dengan *domain extents* sebagai berikut:

X_{min} (m) : -1.99125	X_{max} (m) : 1.99125
Y_{min} (m) : 0	Y_{max} (m) : 8.1125
Z_{min} (m) : -1.99125	Z_{max} (m) : 1.99125

Solver type menggunakan *pressure-based* dengan *solver time* : *steady*.

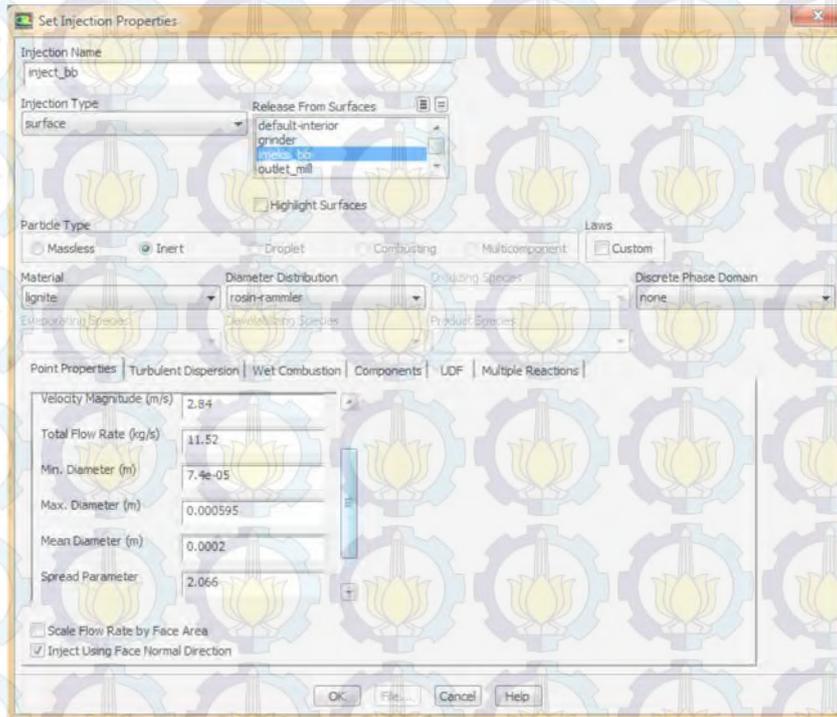
Gravitational acceleration disetting pada nilai -9.8 m/s^2 arah sumbu Y.

▪ **Model**

Energy equation di-On kan. Setting *viscous models* menggunakan model turbulen *k-standar wall function*.

Discrete phase diaktifkan dengan menggunakan *interaction with continous phase*. *Drag law* dimodelkan dalam *spherical* karena partikel batubara diasumsikan berbentuk bulat.

Injection untuk batubara ditentukan tipe *surface injection* pada posisi injeksi *bb (area bowl)*. Partikel injeksi bertipe *inert*, material *lignite*, pendekatan *rosin-rammler* digunakan untuk menentukan persebaran/distribusi diameter batubara.



Gambar 3.4. Setup properti injeksi batubara pada rencana simulasi

Gambar 3.4 menunjukkan setup propertis injeksi batubara, adapun *point properties* untuk setup injeksi adalah sebagai berikut:

- Temperatur batubara: 307°K
- Velocity magnitude*

$$\dot{m} = \int \rho \times \vec{v} \times d\vec{A} \quad (3.1)$$

di mana:

$$\dot{m} = \text{mass flow rate batubara} = 11.52 \text{ kg/s}$$

$$\rho = \text{density batubara} = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$A = \text{luas area surface injeksi batubara} = 3.25 \text{ m}^2$$

Maka dari persamaan 3.1 di atas, *velocity magnitude* pada injeksi batubara diperoleh sebesar 2.84 m/s

- Berdasarkan data pada tabel 3.2, diperoleh persebaran ukuran batubara sebagai berikut:

$$\text{Maximal diameter} : 0.000595 \text{ m}$$

$$\text{Minimal diameter} : 7.4e-5 \text{ m}$$

$$\text{Mean diameter} : 0.0002 \text{ m}$$



d. Perhitungan *spread parameter* injeksi batubara menggunakan metode *rosin-rammler*.

$$Y_d = e^{[d/\bar{d}]^n} \quad (3.2)$$

di mana:

Y_d = Fraksi massa untuk *minimal diameter* = 0.7469

d = *minimal diameter* = 7.4×10^{-5} m

\bar{d} = *mean diameter* = 0.0002 m

n = *spread parameter*

dari persamaan 3.2, *spread parameter* injeksi batubara dapat dihitung menggunakan persamaan

$$n = \frac{\ln(-\ln(Y_d))}{\ln\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)} \quad (3.3)$$

maka nilai *spread parameter* diperoleh sebesar 1.24

- **Material**

Pada setup material, digunakan *default fluid air* dan *inert particle* untuk lignite.

- **Boundary Condition**

Boundary condition pada simulasi ini terbagi menjadi empat zona, seperti yang dituliskan pada tabel 3.4 berikut:

Tabel 3.4. Boundary condition simulasi

Air inlet	Injeksi batubara	Outlet mill	Wall	
			Moving	stationary
Type: Mass flow rate $\dot{m} = 21.036$ kg/s Pressure = 6140 Pa Temp = 439.16°K	Type: Mass flow rate $\dot{m} = 11.52$ kg/s Temp = 307°K	Type: outflow	Grinder dan bowl Speed: 0.55 rad/s	Body mill



3.3.3. Post Processing

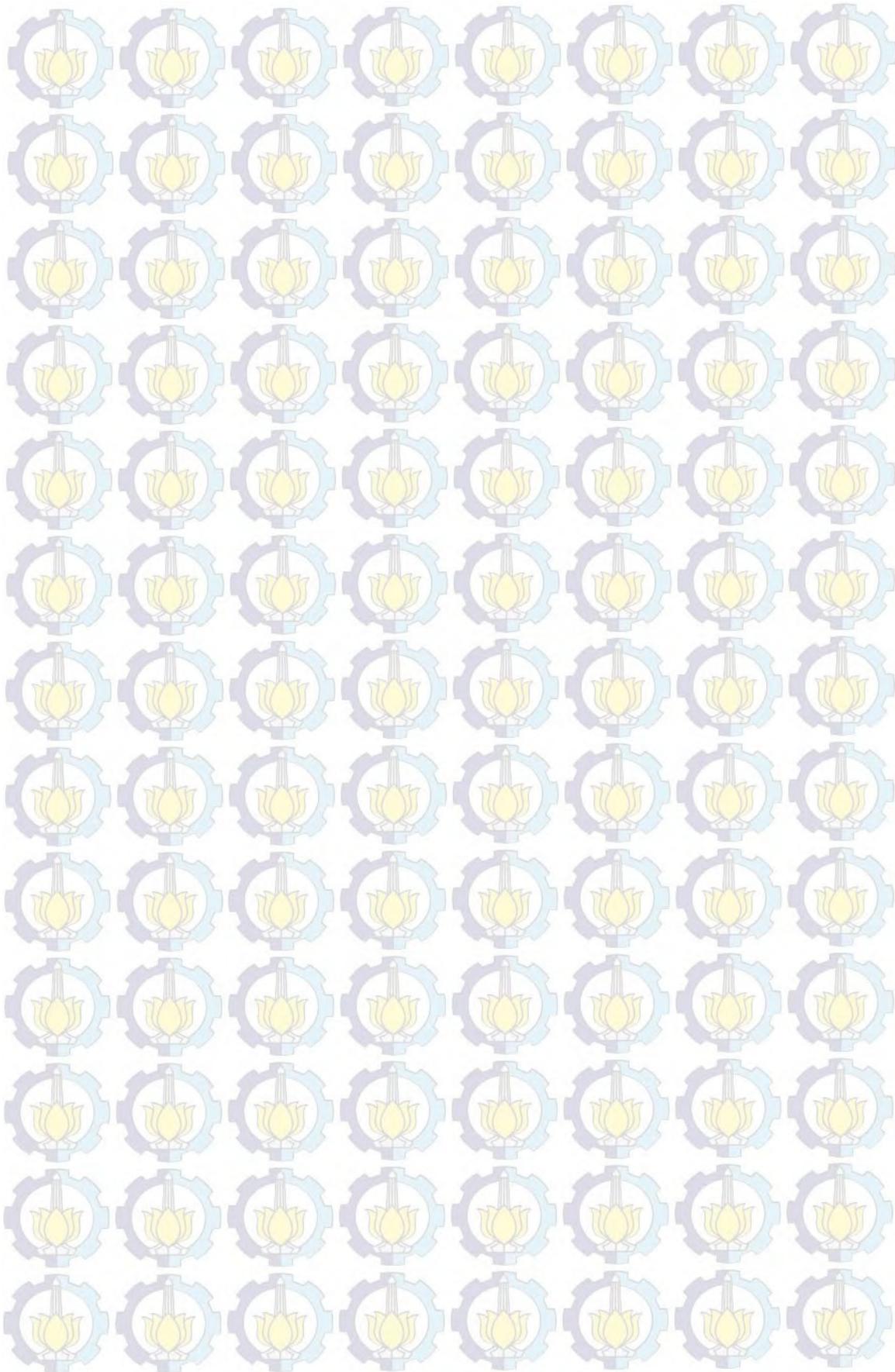
Merupakan analisa terhadap hasil yang diperoleh dari simulasi yang telah dilakukan. Data yang diperoleh berupa data kualitatif (kontur maupun vektor) dan data kuantitatif (grafik). Analisa akan dilakukan berdasarkan distribusi temperatur (kontur dan grafik).

3.4. Rancangan Simulasi

Untuk dapat mencapai hasil yang diharapkan sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, simulasi numerik pada *Fluent* dilakukan dengan menaikkan nilai temperatur udara primer secara bertahap. Sedangkan untuk propertis batubara dianggap sebagai parameter konstan. Batasan yang ditetapkan pada rancangan simulasi ini dituliskan sebagai berikut:

1. Nilai awal yang ditetapkan untuk temperatur udara primer adalah 166°C atau sebesar 439°K
2. Dilakukan tiga variasi temperatur udara primer, yaitu 443°K , 448°K , 463°K

Sebelum rancangan simulasi di atas dapat diterapkan, perlu dilakukan validasi model yang telah di buat. Proses validasi ini menggunakan acuan nilai temperatur *outlet mill* yang disesuaikan dengan kondisi aktual pada saat *performance test*. Nilai temperatur outlet mill untuk validasi yaitu 58°C atau sebesar 331°K .





BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Sebelum melakukan simulasi dengan beberapa kasus variasi nilai temperatur udara primer, dilakukan validasi terhadap model *coal pulveriser mill* yang telah dibuat.

4.1. Validasi

Validasi model 3D untuk *coal pulveriser mill* yang telah dibuat, dilakukan dengan membandingkan nilai MOT (*Mill Outlet Temperature*). Nilai MOT yang aktual sesuai dengan kondisi operasi pada saat uji performans unit dibandingkan dengan nilai MOT hasil simulasi dengan *fluent*.

Pengambilan nilai MOT pada simulasi dilakukan pada jumlah iterasi 3100 dengan nilai yang mendekati data aktual. Nilai error yang dihasilkan sebesar 5.17%. Perhitungan *mass flow rate* total untuk seluruh *boundaries* diperoleh sebesar $1.865e-14$ kg/s.



Gambar 4.1. Grafik Perbandingan Nilai MOT aktual dengan hasil Running Fluent

4.2. Analisa Hasil Simulasi Numerik

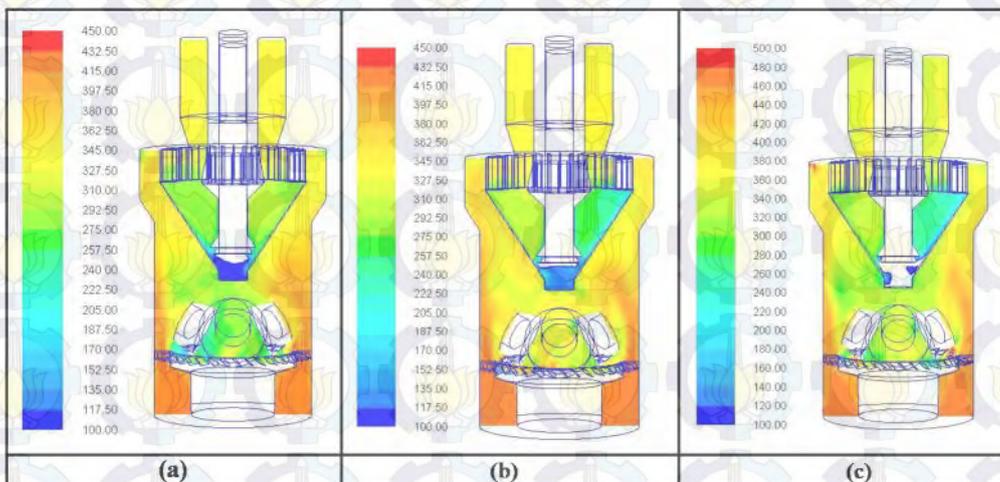
Analisa dilakukan dengan menaikkan nilai temperatur udara primer pada nilai tertentu sebanyak tiga kali variasi. Simulasi *fluent* dilakukan dengan nilai temperatur udara primer sebesar 443°K , 448°K dan 463°K . Nilai MOT

yang dihasilkan dari variasi tersebut adalah secara berurutan 335°K, 336°K dan 350°K.

Hasil simulasi yang dianalisa adalah distribusi temperatur serta persebaran partikel batubara di dalam mill. Pengamatan dilakukan pada posisi x-center (koordinat $x=0$) serta beberapa elevasi (koordinat y) tertentu yaitu pada $y=2$, $y=5.3$ dan $y=6.3$.

4.2.1. Distribusi Temperatur Pada x-center (koordinat $x=0$)

Pengamatan terhadap distribusi temperatur pada posisi x-center ini dilakukan untuk mengetahui persebaran temperatur di dalam *coal pulveriser mill*. Mulai dari temperatur pada inlet udara primer di bawah *bowl* kemudian mulai bercampur dengan batubara pada elevasi *bowl* sampai dengan keluar mill. Distribusi temperatur (kelvin) di dalam mill ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Distribusi temperatur di dalam mill pada pada seting temperatur udara primer (a) 443°K, (b) 448°K dan (c) 463°K

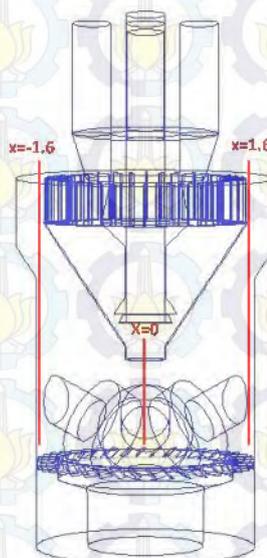
Warna merah pada ketiga gambar di atas menunjukkan daerah dengan temperatur tinggi. Pada gambar 4.2, menunjukkan persebaran temperatur di dalam mill tidak merata, daerah bertemperatur tinggi berada di kedua sisi penampang. Posisi *vane-wheel* sebagai jalur udara masuk ke dalam mill berada di sekeliling luar *bowl*. Sehingga aliran udara membawa batubara ke atas lebih banyak terjadi di tepi dan persebaran temperatur di bagian tengah jarang terjadi.



Jika diamati kembali gambar 4.2. di atas terlihat bahwa temperatur panas di sebelah kiri lebih merata sampai level atas (*classifier*) jika dibandingkan dengan temperatur di sebelah kanan. *Blade vane-wheel* yang dipasang miring ke kiri menyebabkan aliran turbulen yang terjadi pada udara berputar pada koordinat y negatif. Selain itu, batubara yang diinjeksikan pada *surface bowl* tepat di bawah *grinder*, lebih banyak terarah ke kiri oleh pergerakan memutar *bowl* dan *grinder*.

Karena batubara lebih banyak terarah ke sisi kiri, berarti semakin banyak partikel batubara yang dibawa oleh udara. Proses pengeringan batubara dan penyerapan panas udara oleh batubara lebih banyak terjadi di sebelah kiri.

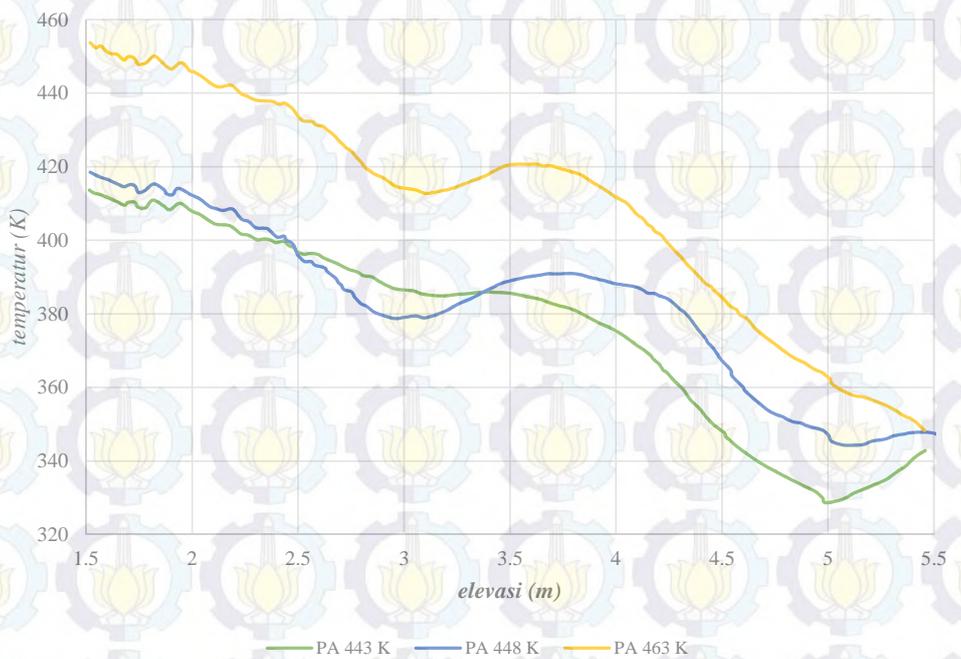
Pencampuran fluida lebih optimal di daerah separasi, yaitu di sebelah luar *cone*. Untuk daerah di dalam *cone*, perambatan panasnya berjalan dengan lambat. Sehingga pada gambar 4.2. daerah di dalam *cone* ditunjukkan distribusi temperaturnya berwarna biru. Pada penelitian ini, fungsi *cone* diabaikan sebagaimana fungsi *coal inlet pipe*. Karena partikel batubara yang digunakan sudah memiliki diameter ukuran mikron, sehingga semua partikel batubara yang melewati *classifier* akan langsung diteruskan menuju *outlet mill*. Tidak ada partikel batubara yang jatuh kembali ke *bowl* melewati *cone*. Kontur temperatur yang terlihat di dalam *cone* merupakan hasil perambatan panas dari udara.



Gambar 4.3. Tiga zona pengambilan data distribusi temperatur (K) di dalam mill sepanjang elevasi y

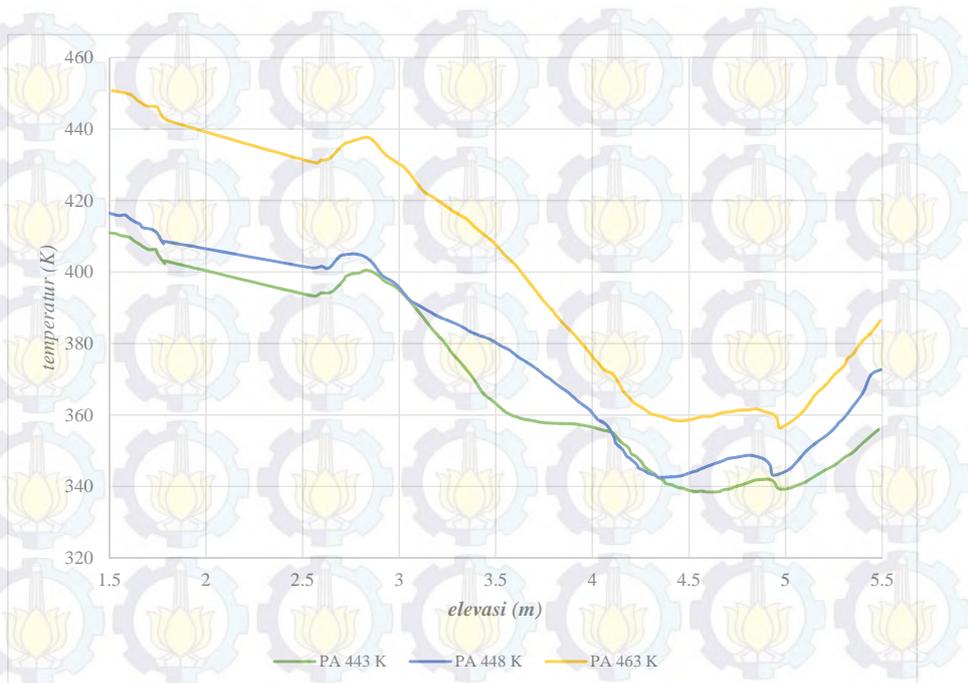


Untuk memperjelas distribusi temperatur fluida di dalam mill, dilakukan pengambilan data nilai temperatur sepanjang elevasi mill (koordinat y) pada koordinat x tertentu. Zona pengambilan data tersebut yaitu sepanjang koordinat $x=-1.6$, $x=0$ dan $x=1.6$, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.4. Distribusi temperatur di dalam mill pada koordinat $x= -1.6$

Gambar 4.4 merupakan grafik persebaran nilai temperatur fluida di dalam mill untuk zona pengambilan 1 yaitu pada koordinat $x= -1.6m$, $z=0m$ dan $y= 1.5m$ s.d. $5.5m$. Tren perubahan temperatur untuk daerah pengambilan ini menunjukkan kecenderungan untuk turun. Hal ini karena proses penyerapan panas udara oleh batubara berjalan dengan optimal. Sehingga terjadi proses penyeimbangan temperatur fluida antara batubara dan udara. Lonjakan temperatur terjadi pada elevasi $y=3.5m$ yaitu ketika area aliran fluida terdapat belokan dari bentuk *body mill*. Pada saat ini kecepatan aliran menurun sehingga memungkinkan terjadi gesekan antar fluida. Setelah ini temperatur fluida menunjukkan penurunan pada daerah masuk *classifier*.



Gambar 4.5. Distribusi temperatur di dalam mill pada kordinat $x=1.6$

Gambar 4.5 merupakan grafik persebaran nilai temperatur fluida di dalam mill untuk zona pengambilan 1 yaitu pada kordinat $x=1.6$ m, $z=0$ m dan $y=1.5$ m s.d. 5.5 m. Penurunan temperatur fluida yang ditunjukkan pada gambar 4.5 merupakan indikasi terjadinya proses penyerapan panas udara oleh batubara.



Gambar 4.6. Distribusi temperatur di dalam mill pada kordinat $x=0$ (center mill)

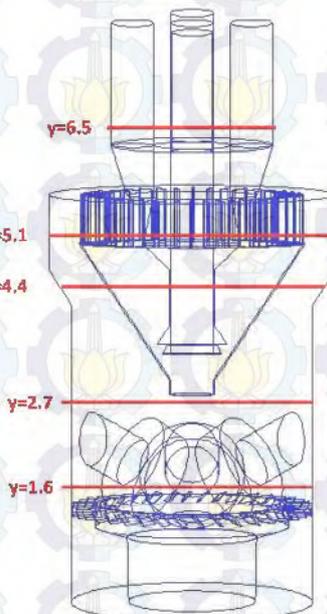


Gambar 4.6 merupakan grafik persebaran nilai temperatur fluida di dalam mill untuk zona pengambilan 3 yaitu pada kordinat $x=0m$, $z=0m$ dan $y=1.5m$ s.d. $2.8m$. Zona pengambilan 3 ini disebut juga *center mill* yang dimulai dari *bowl* sampai dengan *surface* bagian bawah *cone*.

Pada daerah tengah *bowl*, pencampuran kedua fluida tidak optimal, sehingga proses perpindahan panas udara ke batubara tidak banyak memberikan pengaruh terhadap perubahan temperatur. Partikel batubara yang diinjeksikan dari bawah *grinder* tidak banyak yang mengalir ke bagian tengah *bowl*.

4.2.2. Distribusi Temperatur Pada Elevasi y Tertentu

Pengambilan data distribusi temperatur pada beberapa elevasi tertentu, bertujuan untuk mengetahui nilai temperatur fluida di dalam *coal pulveriser mill* pada elevasi yang berbeda. Data temperatur pada tiap elevasi ini diperoleh dengan menghitung nilai temperatur rata-rata menggunakan perintah *facet average* pada *fluent*. Elevasi pengambilan data distribusi temperatur fluida di dalam *coal pulveriser mill* ini ditunjukkan pada gambar 4.7.



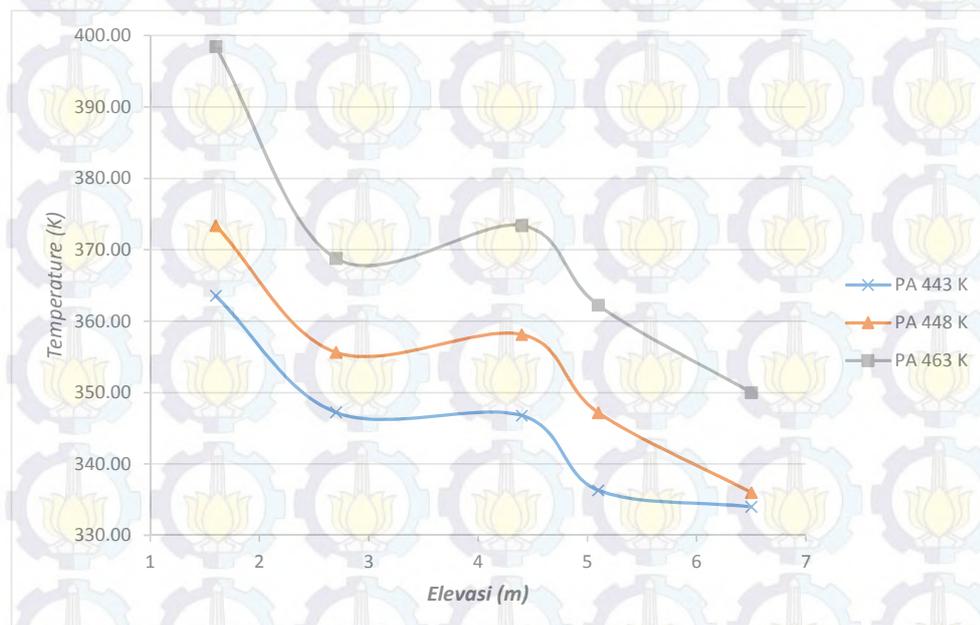
Gambar 4.7. Pengambilan data distribusi temperature (K) dan velocity (m/s) pada elevasi y tertentu



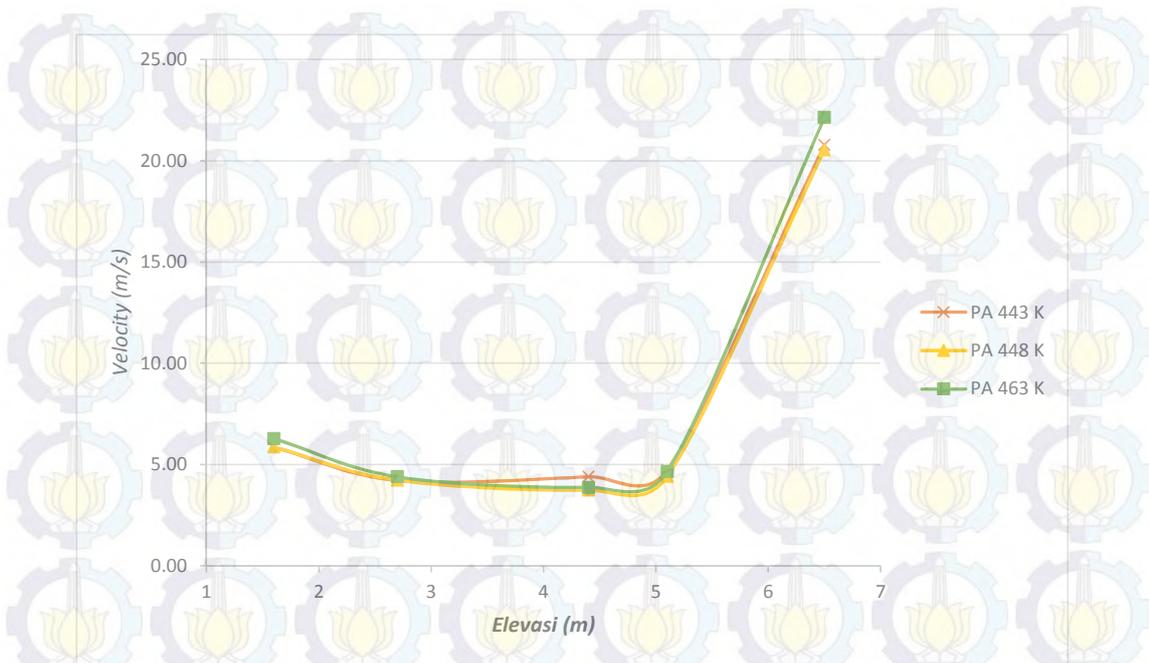
Elevasi pengambilan data ini ditentukan berdasarkan beberapa pertimbangan, yaitu:

1. Daerah sesaat pertemuan antara dua fluida, elevasi $y=1.6\text{m}$
2. Daerah tepat di atas *grinder*, di mana area pergerakan fluida lebih luas karena tidak ada penghalang. Elevasi $y=2.7\text{m}$.
3. Daerah sebelum masuk *classifier*, di mana area pergerakan fluida mengalami penyempitan. Elevasi $y=4.4\text{m}$.
4. Elevasi *classifier*, di mana pergerakan fluida mengalami penyempitan area ketika melewati *classifier*. Elevasi $y=5.1\text{m}$.
5. Daerah pipa keluaran *coal pulveriser mill*. Elevasi $y=6.5\text{m}$

Gambar 4.8 dan 4.9 berikut merupakan grafik data temperatur dan *velocity* fluida untuk tiap elevasi di dalam *coal pulveriser mill*.



Gambar 4.8. Grafik data distribusi temperature (K) pada elevasi y tertentu



Gambar 4.9. Grafik data distribusi velocity (m/s) pada elevasi y tertentu

Hubungan antara perubahan temperatur dan *velocity* fluida di dalam *coal pulveriser mill*, ditunjukkan pada gambar 4.8 dan 4.9. Di elevasi pertama ($y=1.6\text{m}$) sampai dengan elevasi kedua ($y=2.7\text{m}$) nilai temperatur menunjukkan penurunan. Hal ini disebabkan karena pada elevasi ini, udara panas berkontak langsung dengan batubara dingin di area injeksinya. Sesuai dengan sifat perpindahan temperatur, maka terjadi penyeimbangan nilai temperatur antara udara panas dengan batubara dingin. Batubara menyerap panas yang terdapat pada udara. Delta temperatur antara udara panas dan batubara dingin pada elevasi ini sangat tinggi sekali sehingga penurunan temperatur pada grafik terlihat cukup tajam. Sedangkan pada grafik *velocity*, pada elevasi satu ini mengalami penurunan aliran fluida mengalami hambatan oleh adanya *grinder*. Karena pada elevasi pertama ini kecepatan fluida turun maka hal ini akan memberikan waktu yang cukup bagi batubara untuk menyerap panas udara primer.

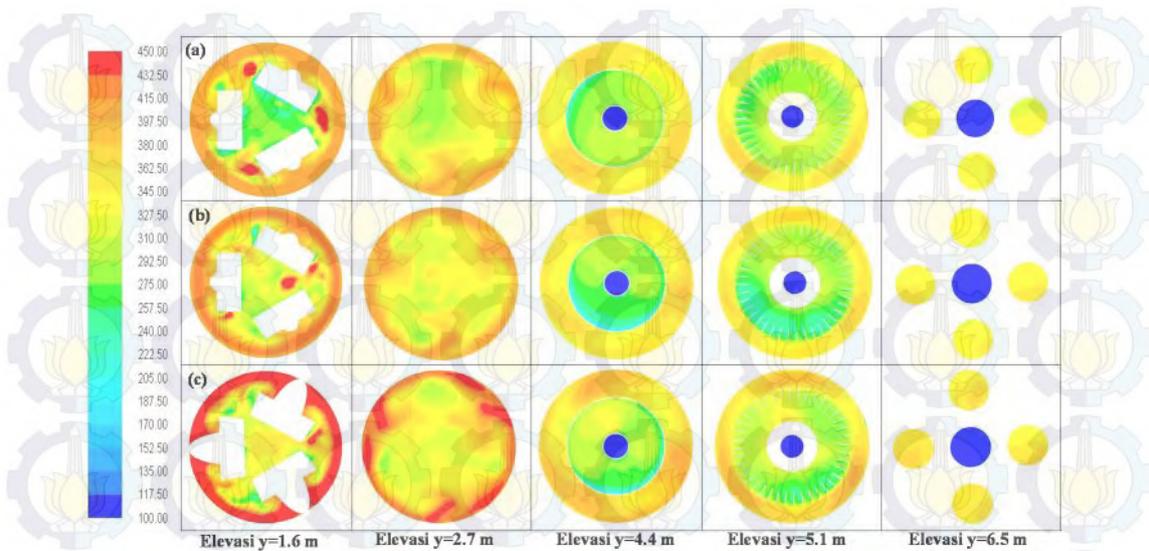
Pada elevasi kedua ($y=2.7\text{m}$) sampai dengan elevasi ketiga ($y=4.4\text{m}$) terlihat dari gambar 4.8 dan 4.9, nilai temperatur dan kecepatan fluida mengalami perubahan yang sangat kecil sehingga seolah-olah nilainya tetap.



Meskipun area pergerakan fluida mengalami penyempitan di area ini, yang seharusnya meningkatkan kecepatan aliran fluida tapi hal itu tidak terjadi. Posisi *cone* yang tepat di tengah *body* ini memberikan hambatan bagi pergerakan fluida yang bergerak ke atas. Fluida yang mengalir di tengah *body* dari elevasi pertama dan kedua akan menabrak bagian bawah *cone*. Sebagai akibatnya, jalur *fluida* yang menabrak bagian bawah *cone* ini akan terpecah dan mengganggu aliran fluida yang berada di pinggir. Karena aliran fluida yang dipinggir terpotong, maka kecepatannya menurun seolah-olah konstan.

Pada elevasi ketiga ($y=4.4\text{m}$) sampai dengan elevasi keempat ($y=5.1\text{m}$) fluida mengalami penurunan nilai temperatur dan peningkatan kecepatan. Pada elevasi ini, fluida melewati *classifier*. Penyempitan area laluan fluida di *classifier* menyebabkan laju aliran fluida menjadi meningkat. Daerah laluan fluida yang sempit ini menyebabkan gesekan antara kedua fluida terjadi, sehingga terjadi penyeimbangan nilai temperatur antara batubara dengan udara. Area laluan *classifier* yang sempit ini juga menyebabkan banyak fluida yang berada di luar area *classifier* sebelum melewatinya karena besarnya *flowrate* fluida yang akan lewat. Pada saat ini proses penyerapan panas udara oleh batubara terjadi karena seolah-olah terdapat waktu tinggal oleh fluida.

Pada elevasi keempat ($y=5.1\text{m}$) dan kelima ($y=6.5\text{m}$) merupakan elevasi setelah keluar dari *classifier* menuju *outlet mill*. Dari *classifier* menuju *outlet mill* fluida melewati bagian leher *coal pulveriser mill* yang areanya lebar di bagian atas dan kemudian menyempit kembali ketika masuk ke pipa *outlet*. Nilai temperatur pada elevasi ini, mengalami penurunan melanjutkan proses *heat transfer* dari elevasi sebelumnya. Sedangkan laju kecepatan alirannya meningkat dikarenakan perubahan luas area laluan yang menyempit.



Gambar 4.10. Tampak atas penampang melintang distribusi temperatur di dalam coal pulveriser mill untuk elevasi y tertentu dengan variasi temperatur udara primer (a) 443°K (b) 448°K dan (c) 463°K

Pada gambar 4.10 untuk elevasi 4.4m, 5.1m dan 6.5m terdapat daerah yang distribusi temperaturnya ditunjukkan berwarna biru atau daerah yang terbaca oleh *fluent* memiliki temperatur rendah. Hal ini dikarenakan, daerah itu merupakan *inlet coal pipe* yang pada penelitian ini diabaikan fungsinya. Seperti yang dijelaskan pada bab 3 bahwa pada penelitian ini menggunakan partikel batubara berukuran *fine* atau batubara yang sudah berukuran mikron. Oleh sebab itu, untuk penjelasan selanjutnya *inlet coal pipe* ini diabaikan keberadaannya.

Pada elevasi $y=1.6\text{m}$ distribusi temperatur bervariasi, daerah bertemperatur tinggi berada di tepi (*wall side*). Pada elevasi ini pencampuran kedua fluida masih belum merata, temperatur udara primer masih sangat tinggi khususnya di daerah tepi (*wall side*).

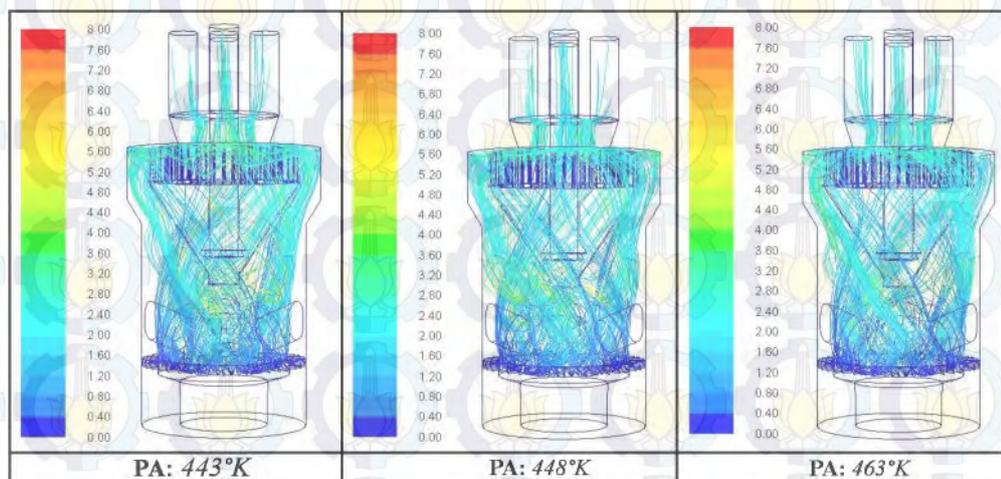
Pada elevasi $y=2.7\text{m}$ distribusi temperatur fluida di seluruh penampang mulai terlihat bercampur meskipun belum optimal. Pada elevasi ini, partikel batubara sudah mulai banyak mengisi daerah tengah. Hal ini karena elevasi ini tepat berada di atas *grinder*, sehingga partikel batubara yang terbawa oleh putaran *grinder* terlepas di elevasi ini. Mulai terlihat penurunan temperatur fluida pada elevasi ini karena pencampuran antara batubara dan udara.

Pada elevasi $y=4.4\text{m}$ dan $y=5.1\text{m}$, distribusi temperatur udara primer terlihat sedikit uniform. Pencampuran antara kedua fluida mulai optimal di elevasi ini sehingga proses penyerapan panas udara oleh batubara juga optimal.

Pada elevasi $y=6.5\text{m}$, temperatur fluida yang tinggi terdapat di sisi pipa yang dekat dengan *inlet pipe*. Fluida yang keluar dari *classifier* cenderung membentuk aliran yang terarah pada sisi pipa dekat *inlet pipe*. Area aliran dari *classifier* menuju *outlet* memaksa fluida berbelok 90° ke atas sehingga fluida cenderung untuk membentuk aliran di sisi pipa sebelah dalam (sisi yang dekat *inlet pipe*).

4.2.3. Particle Track di dalam coal pulveriser mill

Pada gambar 4.11 ditunjukkan *particle track* di dalam *coal pulveriser mill*. Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengetahui waktu tinggal partikel batubara di dalam *coal pulveriser mill* mulai dari titik awal injeksi sampai *outlet mill*.



Gambar 4.11. Particle track di dalam coal pulveriser mill dalam second

Berdasarkan gambar 4.11, aliran partikel batubara mulai dari *surface* injeksi di *bowl* bergerak memutar ke atas menuju *classifier*. Gerakan putar aliran partikel batubara ini disebabkan oleh gaya putar *bowl* dan juga *grinder*. Untuk partikel batubara yang berada di tengah *bowl*, ketika tepat di atas *grinder*, terlihat bahwa partikel menabrak bagian bawah *cone* yang tertutup



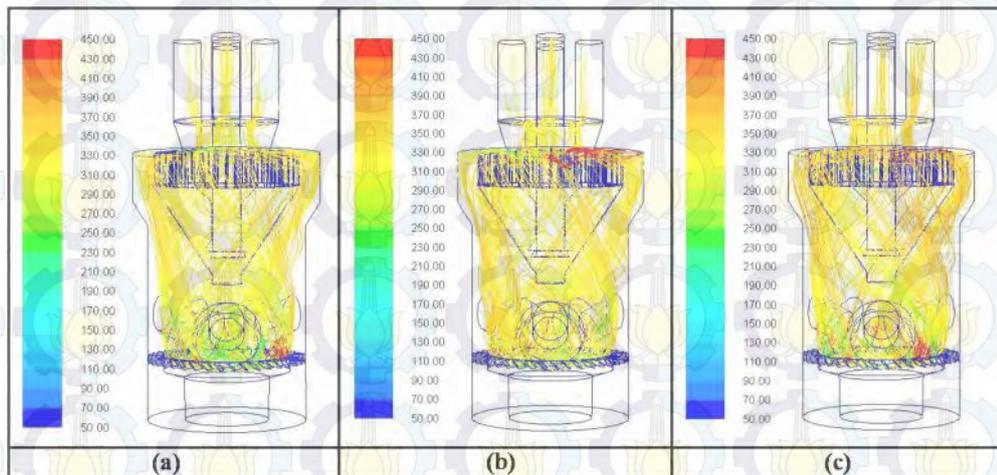
yang menyebabkan aliran partikel terpaksa berbelok ke area tepi. Pada daerah *classifier*, terlihat banyak partikel yang berkumpul di sekitar *classifier* sebelum akhirnya bergerak melewati *classifier*.

Partikel batubara setelah melewati *classifier*, terus bergerak ke atas sampai keluar melali pipa *outlet mill*. Arah gerakan partikel dari *classifier* menuju *outlet mill* ini memiliki belokan tajam sebesar 90° ke atas. Hal ini menyebabkan aliran partikel membentur dinding pipa bagian dalam yang letaknya berseberangan dengan arah kedatangan partikel setelah keluar dari *classifier*.

Bentuk bagian dalam *coal pulveriser mill* memiliki banyak belokan, hal ini dapat menyebabkan banyak partikel yang masih terjebak di dalam *coal pulveriser mill*. Sebagai akibatnya, jumlah partikel batubara yang keluar melewati pipa *outlet mill* menjadi sedikit.

4.2.4. Distribusi Temperatur Partikel Batubara

Pada gambar 4.12 ditunjukkan distribusi partikel batubara berdasarkan temperturnya. Pengamatan distribusi partikel batubara di dalam mill dilakukan untuk mengetahui perubahan temperatur batubara yang terjadi di dalam *coal pulveriser mill*. Selain itu untuk mengetahui di elevasi berapakah temperatur partikel batubara mencapai nilai tertinggi di dalam *coal pulveriser mill*. Dari data distribusi partikel batubara berdasarkan temperatur ini, selanjutnya dapat digunakan untuk memprediksi apakah partikel batubara di dalam *coal pulveriser mill* memiliki kecenderungan untuk terjadi *spontaneous combustion*.



Gambar 4.12. Distribusi partikel batubara berdasarkan nilai temperturnya pada seting temperatur udara primer (a) 443°K, (b) 448°K dan (c) 463°K

Pada gambar (a) terlihat temperatur partikel batubara di area injeksi memiliki temperatur tinggi. Hal ini dikarenakan ukuran partikel yang diinjeksikan bervariasi dengan range ukuran antara 0.0002 ~ 7.4e-05 m. Udara panas yang masih memiliki temperatur yang cukup tinggi, sesaat setelah melewati *vane wheel* mengalami kontak dengan partikel batubara yang berdiameter minimal. Dengan kondisi *grinder* dan *bowl* yang berputar, partikel batubara akan terus bergerak dan mudah terangkat oleh udara primer menuju atas. Partikel batubara ini kemudian bergerak ke atas mengikuti *pathline* nya menuju *classifier*, tidak ada partikel batubara yang tertinggal (*plugging*) di area *bowl* sehingga permukaan batubara yang sudah cukup kering tidak akan terus menerus terkena panas udara.

Untuk simulasi dengan nilai temperatur udara (PA) 448 °K dan 473 °K terlihat bahwa partikel batubara memiliki temperatur tertinggi di elevasi *classifier*. Terlihat temperatur partikel memiliki temperatur tertinggi di elevasi *classifier*. Penyempitan area aliran fluida menyebabkan mudah terjadi gesekan antara batubara dan udara. Tingginya kecepatan fluida ketika melewati *classifier* serta adanya gesekan dengan partikel batubara, mengakibatkan temperatur partikel batubara mengalami peningkatan.



4.3. Analisa Self Combustion

Berdasarkan data temperatur partikel batubara di dalam *coal pulveriser mill* yang dituliskan pada tabel 4.1, dilakukan analisa terhadap kecenderungan partikel batubara terjadi *spontaneous combustion*.

Pada penelitian ini ditentukan dua hal yang dijadikan sebagai syarat suatu terjadi *spontaneous combustion* pada partikel batubara di dalam *coal pulveriser mill*. Dua hal tersebut adalah:

- Kandungan *moisture* di dalam batubara. Kandungan *moisture* di dalam batubara mencapai $\leq 25\%$ dari *inherent moisture* awalnya.
- Temperatur batubara. Temperatur partikel batubara di dalam *coal pulveriser mill* tidak boleh melebihi 338°K .

Apabila kedua syarat tersebut terpenuhi, maka dapat dipastikan bahwa partikel batubara tersebut mengalami *spontaneous combustion*. Jika hanya satu syarat yang terpenuhi, partikel batubara dapat dikatakan memiliki kecenderungan untuk mengalami *spontaneous combustion*.

4.3.2. Analisa Berdasarkan Nilai Temperatur Partikel Batubara

Berdasarkan gambar 4.12, maka dapat ditarik data temperatur partikel batubara tertinggi di dalam *coal pulveriser mill* menggunakan program *fluent* sebagai berikut:

Tabel 4.1. Data temperatur partikel batubara tertinggi di dalam *coal pulveriser mill*

T_a	T_c	T_y
443	307	439
448	307	445
463	307	450

dimana:

T_a = temperatur udara primer yang divariasikan ($^{\circ}\text{K}$)

T_c = temperatur batubara yang diinjeksikan ($^{\circ}\text{K}$)

T_y = temperatur partikel batubara tertinggi di dalam *coal pulveriser mill* ($^{\circ}\text{K}$)



Batasan minimal temperatur partikel batubara untu mudah mengalami *spontaneous combustion* adalah $\geq 338^\circ\text{K}$. Maka, dari hasil pengambilan data temperatur partikel batubara pada tabel 4.1, dapat dilihat bahwa temperatur partikel batubara pada simulasi ini memenuhi syarat untu terjadi *spontaneous combustion*.

Dengan ketiga variasi nilai temperatur udara primer yang dilakukan, sedangkan untu data:

- *Flowrate* udara primer
- Temperatur batubara yang diinjeksikan
- *Flowrate* batubara yang diinjeksikan

dalam simulasi yang dilakukan diatur pada nilai tetap, menghasilkan temperatur partikel batubara tertinggi pada nilai melebihi batas minimal syarat *spontaneous combustion*.

4.3.3. Analisa Berdasarkan *Coal Moisture Content*

Analisa kedua untu permasalahan *spontaneous combustion* pada partikel batubara ini adalah dengan mengestimasi kandungan *moisture* yang terkandung di dalam partikel batubara. Untu menghitung estimasi kandungan *moisture* di dalam batubara digunakan persamaan balans energi sederhana pada sistim *coal pulveriser mill*.

Dalam proses *drying*, nilai tekanan parsial udara pengering sangat menentukan apakah penguapan *moisture* batubara dapat terjadi. Oleh karena itu sebelum dilakukan perhitungan estimasi kandungan *moisture* di dalam partikel batubara terlebih dahulu dilakukan perhitungan terhadap tekanan parsial udara pengering dan batubara.

Jika diketahui:

- Temperatur ambient (T_{atm}) = 33°C (306°K)
- Kelembaban relatif (ϕ) = 70%
- Temperatur udara masuk ke mill = 166.16°C (439.16°K)
- Kelembaban absolut (D) = 0.025



Perhitungan tekanan parsial pada temperatur udara primer masuk *coal pulveriser mill* ($T=439.16^\circ\text{K}$) sebagai berikut:

- Tekanan campuran (P_g) diperoleh dari tabel uap pada $T=166.16^\circ\text{C}$.

$$P_g = 724.92 \text{ kPa}$$

- Tekanan parsial udara primer saat masuk *coal pulveriser mill*

$$p_v = AH \times p_g = 0.025 \times 724.92 \text{ kPa} = 18.12 \text{ kPa}$$

Perhitungan tekanan parsial batubara adalah sebagai berikut:

- Rasio batubara terhadap udara primer = 1:2

Tiap 1000 gr batubara memerlukan 2000 gr udara untuk proses di dalam *coal pulveriser mill*

- *Surface moisture* di dalam batubara = 6.42%

Dalam 1000 gr batubara terdapat 64.2 gr air

- Kelembaban absolut pada *moisture* batubara (D_m) diperoleh dari:

$$D_m = \frac{64.2 \text{ gr}}{2000 \text{ gr}} = 0.0321$$

- Maka tekanan parsial batubara ($P_{v,c}$) dapat dihitung

$$P_{v,c} = 0.0321 \times 724.92 \text{ kPa} = 23.27 \text{ kPa}$$

Dari perhitungan di atas, diperoleh bahwa tekanan parsial batubara memiliki nilai yang lebih besar daripada tekanan parsial udara primer. Sehingga proses *drying* di dalam *coal pulveriser mill* dipastikan dapat terjadi.

Setelah memastikan proses *drying* di dalam *coal pulveriser mill* maka selanjutnya, perhitungan estimasi kandungan *moisture* di dalam partikel batubara dapat dilakukan. Syarat kedua terjadi *spontaneous combustion* pada coal di dalam mill adalah *moisture content* di dalam batubara mencapai 25% dari semula. Dalam penelitian ini *spontaneous combustion* terjadi pada *moisture content* ≤ 0.068 (6.8%). Dari persamaan 2.10 sampai dengan 2.13, maka estimasi kandungan *moisture* di dalam partikel batubara dapat dicari dengan persamaan 4.1



$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_{dry} + Q_{h,c} \quad (2.10)$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \times C_{p,a} \times (T_o - T_{i,a}) \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_{h,c} = \dot{m}_c \times (1 - M_i) \times (T_o - T_i) \times C_{p,c} \quad (2.12)$$

$$\dot{Q}_{dry} = \dot{m}_c \times (M_i - M_o) \times (C_{p,w} \times (100 - T_{amb}) + h_{fg}) \quad (2.13)$$

Maka perhitungan estimasi kandungan *moisture* di dalam partikel batubara

$$M_o = M_i - \left(\frac{\dot{Q}_{dry}}{\dot{m}_{coal} \times C_p \times (100 - T_{amb}) + h_{fg}} \right) \quad (4.1)$$

Jika data dengan nilai konstan untuk perhitungan 4.1 yang diketahui adalah sebagai berikut:

$$C_p = 4.187 \text{ kJ/kg.K}$$

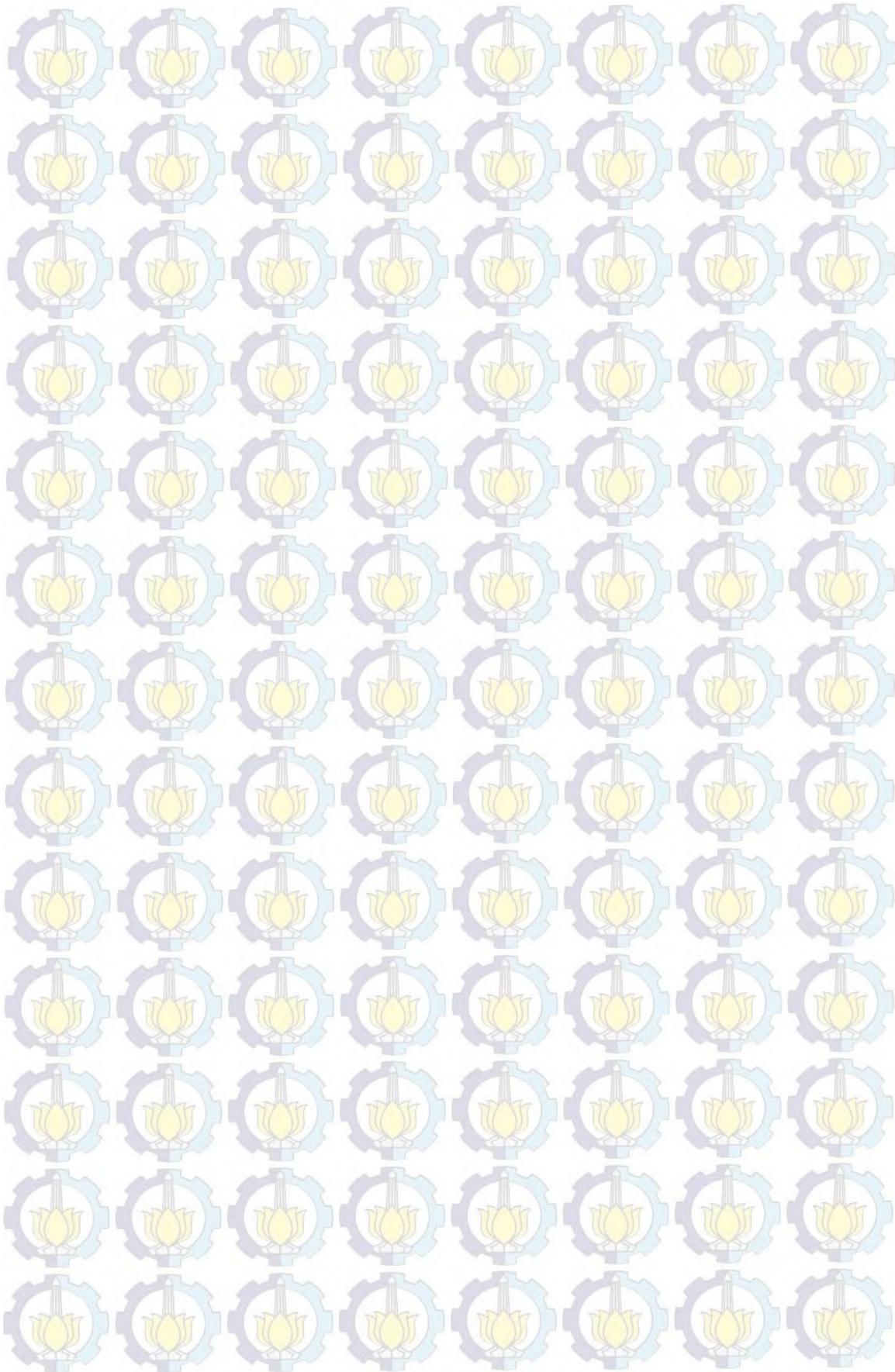
$$h_{fg} = 2260 \text{ kJ/kg}$$

Maka estimasi kandungan *moisture* untuk tiap nilai T_y , dituliskan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Perhitungan nilai *moisture content* untuk tiap nilai T_y

Variasi	Flowrate (kg/s)		Temperatur (K)			Q_a	$Q_{h,c}$	Q_{dry}	M_o
	air	coal	T_a	T_c	T_y				
1	21.036	11.52	443	307	439	-84.67	1859.8	-1944.48	0.074
2	21.036	11.52	448	307	445	-63.51	1944.3	-2007.85	0.075
3	21.036	11.52	463	307	450	-275.19	2014.79	-2289.98	0.081

Berdasarkan data *moisture content* pada tabel 4.2. di atas, menunjukkan bahwa nilai tersebut yang diperoleh masih di atas nilai batas maksimal untuk terjadi *spontaneous combustion*.





BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian dan simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Hasil validasi terhadap nilai *mill outlet temperature* (MOT) simulasi memiliki nilai ketidakpastian sekitar 5.17%.
2. Temperatur udara primer optimal untuk proses di dalam *coal pulveriser mill* sebesar 448°K dengan *output* yang dihasilkan:
 - a. MOT = 336°K
 - b. Temperatur partikel tertinggi = 450°K, pada daerah *classifier* dengan *moisture content* sebesar 9%.
3. *Self combustion* di dalam *coal pulveriser mill* dapat terjadi jika:
 - a. Temperatur partikel $\geq 65^{\circ}\text{C}$ (atau sekitar 338°K)
 - b. *Moisture content* di dalam partikel batubara $\leq 25\%$ dari *inherent moisture* pada saat awal (*as received*)
4. Tekanan parsial pada *moisture* batubara ($P_{v,c} = 23.27$ kPa) memiliki nilai lebih besar dari tekanan parsial pada udara pengering ($P_{v,a} = 18.12$ kPa), sehingga penguapan di dalam *coal pulveriser mill* dipastikan dapat terjadi.
5. Kenaikan nilai temperatur udara primer yang masuk *coal pulveriser mill* memberikan dampak pada kenaikan nilai MOT, sedangkan penurunan *moisture* batubara tidak signifikan.



5.2. Saran

Dari simulasi yang telah dilakukan, selanjutnya dalam melakukan penelitian terkait dengan *spontaneous combustion* pada *coal pulveriser mill* ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, di antaranya:

1. *Meshing*.

Bentuk dan jumlah *grid* yang diperoleh dalam proses *meshing* ikut berpengaruh terhadap hasil simulasi. Nilai *residual* dan iterasi untuk mencapai hasil yang konvergen juga dipengaruhi oleh bentuk *meshing*.

2. *Boundary condition*.

Penentuan *boundary condition* dalam proses simulasi mempengaruhi dari akurasi hasil yang diperoleh.

3. Data pembandingan.

Semakin banyak data yang digunakan untuk pembandingan dalam analisa maka semakin baik hasil yang akan didapatkan.

4. *Air/fuel ratio*.

Perbandingan antara jumlah udara dan batubara yang masuk ke dalam *coal pulveriser mill* sebaiknya juga dijadikan pertimbangan dalam melakukan simulasi.