



TUGAS AKHIR - TM091486

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PENGERINGAN
BATUBARA PADA FLUIDIZED BED COAL DRYER
TERHADAP PENGARUH VARIASI TEMPERATUR
AIR HEATER DENGAN TUBE HEATER TERSUSUN
STAGGERED DAN PERBANDINGAN VOLUME
CHAMBER DAN VOLUME BATUBARA SEBESAR
50%**

**AYU SARAH NOVRIZQA
NRP 2108 100 076**

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

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2013**



FINAL PROJECT - TM091486

**NUMERICAL STUDY OF COAL DRYING
CHARACTERISTICS IN FLUIDIZED BED COAL DRYER
TO THE EFFECT OF AIR HEATER TEMPERATURE
VARIATION WITH TUBE HEATER ARRANGED
STAGGERED AND THE RATIO OF CHAMBER VOLUME
AND COAL VOLUME 50%**

**AYU SARAH NOVRIZQA
NRP 2108 100 076**

**Supervisor
Dr. Eng. Ir. Prabowo, M. Eng.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2013**

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PENGERINGAN
BATUBARA PADA FLUIDIZED BED COAL DRYER
TERHADAP PENGARUH VARIASI TEMPERATUR
AIR HEATER DENGAN TUBE HEATER TERSUSUN
STAGGERED DAN PERBANDINGAN VOLUME
CHAMBER DENGAN VOLUME BATUBARA
SEBESAR 50%**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh :

AYU SARAH NOVRIZQA

NRP. 2108 100 076

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M. Eng.(Pembimbing)
(NIP. 196505051990031005)
2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsan, M.Eng.(Penguji I)
(NIP. 195310191979031002)
3. Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng. Sc.(Penguji II)
(NIP. 196604021989031002)
4. Dr. Wawan Aries Widodo ST, MT(Penguji III)
(NIP. 197104051997021001)

**SURABAYA
FEBRUARI, 2013**

**STUDI NUMERIK
KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA PADA
FLUIDIZED BED COAL DRYER TERHADAP
PENGARUH VARIASI TEMPERATUR AIR HEATER
DENGAN TUBE HEATER TERSUSUN STAGGERED DAN
PERBANDINGAN VOLUME CHAMBER DAN VOLUME
BATUBARA SEBESAR 50%**

Nama Mahasiswa : Ayu Sarah Novrizqa
NRP : 2108100076
Jurusan : Teknik Mesin, FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Ir. Prabowo, M. Eng.

ABSTRAK

Penggunaan batubara sebagai sumber energi utama semakin hari semakin meningkat di beberapa negara terutama sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik, industri semen, dan industri-industri lainnya. Sesuai dengan kebijaksanaan pemerintah tentang penganekaragaman atau diversifikasi energi, batubara merupakan alternatif energi pengganti minyak bumi dan gas untuk masa kini maupun masa-masa mendatang. Indonesia mempunyai sumber daya batubara yang cukup besar, yaitu mencapai 105,7 milyar ton. Sebagian besar sumber daya tersebut termasuk ke dalam batubara peringkat rendah berupa lignit dan sub-bituminus yang memiliki kadar air yang tinggi. Tingginya kadar air menyebabkan rendahnya nilai kalor, sehingga pemanfaatan batubara jenis ini menjadi terbatas dan sulit untuk dipasarkan. Oleh karena itu perlu adanya teknologi pengeringan yang dapat meningkatkan nilai kalor dari batubara tersebut.

Dalam proses pengeringan akan melibatkan perpindahan panas dan massa. Proses ini akan didefinisikan dalam suatu studi numerik, dimana penelitian ini dilakukan dengan metode numerik

(Computational Fluid Dynamic) dengan software Fluent 6.3.26. Pemilihan kondisi simulasi digunakan model multiphase Eulerian yang paling cocok untuk memodelkan fluidized bed, model viscous k-ε realizable untuk memodelkan aliran fluida yang turbulen dan skema interpolasi first-order upwind yang merupakan skema interpolasi yang paling ringan dan cepat mencapai konvergen. Serta mempelajari pengaruh temperatur inlet udara pengering yang divariasikan. Variasi temperatur adalah 316 K, 327 K, 339 K. Penelitian ini akan menghitung nilai drying rate serta pengaruh temperatur dan posisi batubara dalam proses pengeringan pada drying chamber fluidized bed coal dryer dengan tube heater tersusun staggered serta pengaruh dari perbandingan volume batubara dengan volume chamber sebesar 50%.

Dari penelitian ini dapat diketahui karakteristik pengeringan pada ruang pengering batubara tipe fluidized bed dengan tube heater tersusun staggered. Didapatkan kesimpulan bahwa susunan batubara dalam ruang pengering tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap laju pengeringan batubara. Laju pengurangan moisture content terbesar didapatkan pada temperature inlet air heater 339K diikuti dengan temperatur 327K serta 316K. Konfigurasi tube heater secara staggered menimbulkan proses heating disertai proses humidifikasi, sehingga kondisi udara di sekitar tube heater mengalami peningkatan temperatur dan humidity ratio serta penurunan relative humidity.

Kata Kunci : Fluidized Bed Coal Dryer, Staggered Tube Heater, Moisture content, CFD, Pemodelan 2D

**NUMERICAL STUDY OF COAL DRYING
CHARACTERISTICS IN FLUIDIZED BED COAL
DRYER TO THE EFFECT OF AIR HEATER
TEMPERATURE VARIATION WITH TUBE
HEATER ARRANGED STAGGERED AND THE
RATIO OF CHAMBER VOLUME AND COAL
VOLUME 50%**

Student Name : Ayu Sarah Novrizqa
NRP : 2108100076
Department : Mechanical Engineering, FTI - ITS
Academic Supervisor : Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

ABSTRACT

The use of coal as the main energy source is increasingly rising in some countries, mainly as a fuel in power generation, cement, and other industries. According to the government's policy of energy diversification, coal is an alternative energy substitute for oil and gas at present and the future. Indonesia has coal resources are large enough, that reached 105.7 billion ton. Most of these resources included to the low-rank coal such as lignite and sub-bituminous coal with a high moisture content. The high water content leads to lower heating value, so the use of this type of coal is limited and difficult to be marketed. Therefore we need drying technology that can improve the calorific value of the coal.

In the drying process will involve heat and mass transfer. This process will be defined in a numerical study, where the research was carried out by numerical methods (Computational Fluid Dynamic) with Fluent 6.3.26 software. The selection of simulation conditions used Eulerian multiphase model that most suitable for fluidized bed modeling, $k-\epsilon$ turbulence models for modeling turbulent fluid flow and schemes realizable first-order upwind interpolation which is the lightest and quickly reach

convergence. And study the effect of drying air inlet temperature were varied. Variations in temperature is 316 K, 327 K, 339 K. This study will calculate the value of drying rate and the effect of temperature and position of coal in the process of drying the drying chamber fluidized bed coal dryer with heater tube arranged staggered and the influence of the ratio of the volume of coal to the chamber volume by 50%.

From this study it can be seen drying characteristics of the type of coal drying chamber fluidized bed with a heater tube arranged staggered. It was concluded that the position of the coal in the drying chamber does not have a significant influence on the rate of drying coal. The reduction rate of moisture content obtained at the largest water heater inlet temperature followed by temperature 327K, 339K, and 316K. A staggered tube heater configuration causes heating with humidification process, so that the air condition around the tube heater have increased the temperature and humidity ratio, with the decreased of relative humidity

Key Words : Fluidized Bed Coal Dryer, Staggered Tube Heater, Moisture content, CFD, 2D Modeling

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT karena hanya dengan bimbingan, petunjuk, dan kasih sayang-Nya akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir berjudul :

STUDI NUMERIK

KARAKTERISTIK PENDINGINAN BATUBARA PADA FLUIDIZED BED COAL DRYER TERHADAP PENGARUH VARIASI TEMPERATUR AIR HEATER DENGAN TUBE HEATER TERSUSUN STAGGERED DAN PERBANDINGAN VOLUME CHAMBER DAN VOLUME BATUBARA SEBESAR 50%

Penulis berharap dari tugas akhir ini dapat diambil suatu manfaat, meskipun masih banyak kekurangan dalam kualitas penelitian tugas akhir ini.

Akhirnya penulis ingin berterima kasih kepada orang-orang di sekitar penulis yang secara langsung maupun tidak langsung ikut terlibat dalam penulisan tugas akhir ini. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. **Bapak Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng**, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan, dan waktu di tengah segala kesibukannya sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai.
2. **Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichسانی, M.Eng, Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc, dan Dr. Wawan Aries Widodo ST., MT.**, selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk menguji Tugas Akhir

- ini dan terima kasih atas semua kritik, saran dan masukan demi kesempurnaan proposal tugas akhir ini
3. **Bapak Prof. Dr. Ir Triyogi Yuwono, DEA** selaku dosen wali penulis atas bimbingan, arahan, dan waktu untuk konsultasi demi kelancaran kuliah penulis.
 4. **Ibu Anggraini Susetyowati dan Bapak Pundyanarko**, atas kasih sayang dan doanya yang senantiasa menemani, memberi nasihat dan memberi semangat penulis baik mental, spiritual, dan finansial. Cinta kalianlah yang paling besar diantara manusia yang pernah ada di bumi ini
 5. **Adik-adikku Chaira Nabila dan Naomi Hurayah Aden** yang juga membantu dan selalu memberi banyak dukungan sampai terselesaikannya tugas akhir ini “Terimakasih buat doa dan supportnya selalu”.
 6. **Rantau Wijaya** yang dukungan dan perhatiannya tanpa henti-hentinya selalu diberikan demi terselesainya tugas akhir ini
 7. Si Kecil **Marizqa Kartika Wijaya** yang senyuman dan kepolosannya selalu memberi semangat yang luar biasa bagi penulis
 8. Teman berbagi dalam suka maupun duka dan sahabat karib di kampus serta para anggota laboratorium perpindahan panas yang berjuang bersama-sama dalam menyelesaikan Tugas Akhir, “Terimakasih teman atas dukungan, support, kehangatan, kenyamanan, dan segala bantuannya.
 9. Segenap saudaraku **M51** Angkatan 2008, semoga silaturahmi ini tetap terus terjaga. Semangat dan semoga sukses selalu buat kita semua.

10. Tidak lupa, semua pihak yang telah banyak membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan yang dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk penelitian selanjutnya. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Surabaya, Februari 2013

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Batasan Penelitian.....	6
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	7
1.6 Sistematika Penulisan.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Dasar Teori	9
2.1.1 Batubara dan Jenisnya	9
2.1.2 Proses Pengeringan	10
2.1.3 Prinsip Perpindahan Massa	13
2.1.4 Analogi Perpindahan Panas dengan Perpindahan .. Massa	15
2.1.5 Prinsip Psikometri.....	16
2.2 Fluidized Bed Coal Dryer.....	20
2.3 Penelitian Terdahulu.....	22
2.3.1 M.Zeki Yilmazoglu (2011)	22
2.3.2 Levy dkk (2006).....	23
2.3.3 Sarjono Asminto P (2007)	27
BAB III METODE PENELITIAN	33
3.1 Model Pengeringan Batubara.....	33
3.2 Preprocessing.....	34
3.2.1 Domain Pemodelan Coal Drying Chamber	34

3.2.2	Variabel Penelitian Umum.....	36
3.2.3	Meshing.....	36
3.3	Processing	38
3.4	Postprocessing.....	44
3.5	Flowchart Metode Penelitian.....	45
3.6	Flowchart Perhitungan.....	46
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Data Penelitian.....	49
4.2	Contoh Perhitungan	49
4.2.1	Menghitung Density H ₂ O pada permukaan Batubara	50
4.2.2	Menghitung Density H ₂ O pada udara inlet.....	51
4.2.3	Perhitungan Setelah Running Fluent.....	51
4.2.4	Boundary Condition untuk Running Selanjutnya	54
4.3	Analisa Kontur dan Drying Rate dengan Variasi Susunan Batubara.....	55
4.3.1	Analisa Kontur Temperatur	55
a.	Temperatur Inlet 316K....	55
b.	Temperatur Inlet 327 K	58
c.	Temperatur Inlet 339K.....	60
4.3.2	Analisa Kontur Fraksi Massa H ₂ O	62
a.	Temperatur Inlet 316K.....	62
b.	Temperatur Inlet 327 K.....	64
c.	Temperatur Inlet 339K.....	66
4.3.3	Analisa Drying Rate.....	65
4.4	Analisa Grafik dan Psychrometric Chart	70
4.4.1	Grafik Moisture Content pada Batubara terhadap Waktu pada Susunan Acak 1	70
4.4.2	Analisa Psychrometric Chart	71
BAB V PENUTUP		79
5.1	Kesimpulan	79
5.2	Saran	80

DAFTAR PUSTAKA.....	81
LAMPIRAN	83
Lampiran 1.....	83
Lampiran 2.....	89
Lampiran 3.....	92

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Persebaran produksi batubara Indonesia tahun 2004-2012.....	2
Tabel 1.1 Persebaran produksi batubara seluruh Indonesia.....	2
Tabel 2.1 Properties Batubara.....	10
Tabel 3.1 Geometri <i>Drying Chamber</i>	34
Tabel 3.2 Boundary Condition Drying Chamber.....	39
Tabel 4.1 Properti Udara pada Temperatur Inlet 316 K	72
Tabel 4.2 Properti Udara pada Temperatur Inlet 327 K	73
Tabel 4.3 Properti Udara pada Temperatur Inlet 339 K	73

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

A	=	luas area (m^2)
c_p	=	specific heat ($J/kg.K$)
C	=	konsentrasi ($kgmol/m^3$).
D_{AB}	=	Diffusivity (m^2/s)
g	=	percepatan gravitasi (m/s^2)
h	=	enthalpy spesifik dari <i>moist air</i> (J/kg)
h_a	=	enthalpy spesifik dari <i>dry air</i> (J/kg)
h_w	=	enthalpy spesifik dari uap air (J/kg)
h	=	koefisien konveksi ($W/m^2.K$)
h_m	=	mass transfer coefficient (m/s)
h_{fg}	=	kalor laten penguapan (J/kg)
k	=	<i>thermal conductivity</i> ($W/m.K$)
Le	=	Lewis number
m_a	=	massa <i>dry air</i> (kg)
m_w	=	massa uap air (kg)
MC	=	moisture content
Nu	=	bilangan Nusselt
n_A	=	laju penguapan (kg/s)
n_a	=	jumlah mol <i>dry air</i> (mol)
n_w	=	jumlah mol uap air (mol)
p_a	=	tekanan parsial <i>dry air</i> (Pa)
p_w	=	tekanan parsial uap air (Pa)
p_{ws}	=	tekanan jenuh uap air (Pa)
Pr	=	bilangan Prandtl
q''	=	<i>heat flux</i> (W/m^2)
R	=	<i>universal gas constant</i>

R_a	=	konstanta gas untuk udara kering
R_w	=	konstanta gas untuk uap air
Re	=	bilangan Reynolds
Sc	=	bilangan Schmidt
Sh	=	bilangan Sherwood
T	=	temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wb}	=	temperatur bola basah ($^{\circ}\text{C}$)
t	=	waktu (s)
V	=	volume (m^3)
v	=	kecepatan udara (m/s)
w	=	rasiokelambaban (kg uap air/kg udarakering)
Y	=	fraksi massa (kg /kg)

Greek Symbols

∞	=	udara
ϕ	=	kelembaban relatif
ρ	=	massa jenis (kg/m^3)
μ	=	viskositas (Ns/m^2)
ν	=	viskositaskinematis (m^2/s)
α	=	diffusivitas panas (m^2/s), <i>absorbivity</i>

Subscripts

D	=	diameter
f	=	film
i	=	kondisi awal
L	=	panjang
∞	=	ambient

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Persebaran Batubara di wilayah Indonesia berdasarkan nilai kalori.....	3
Gambar 1.2	Persebaran batubara Kalimantan dan Sumatera berdasarkan nilai kalori.....	4
Gambar 1.3	Diagram persebaran batubara dunia.....	4
Gambar 2.1	Jenis-jenis Batubara.....	9
Gambar 2.2	Grafik Periode Pengeringan	12
Gambar 2.3	Prinsip Pengeringan pada Psikometri Chart.....	17
Gambar 2.4	Sistem <i>Fluidized Bed Dryer</i>	21
Gambar 2.5	Skema <i>Rotary Dryer</i>	22
Gambar 2.6	Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Proses Pengeringan pada Rotary Dryer	23
Gambar 2.7	Alat Eksperimen Penelitian Levy,dkk.....	24
Gambar 2.8	Grafik Pengaruh Pengeringan Batubara Terhadap Penghematan	25
Gambar 2.9	Grafik Pengaruh Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara	26
Gambar 2.10	Grafik Temperatur Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara.....	27
Gambar 2.11	Model Porositas dalam Tiga Dimensi (Sarjono Asminto 2007).....	28
Gambar 2.12	Grafik laju penguapan kecepatan inlet 2.5 m/s	29
Gambar 2.13	Grafik laju penguapan kecepatan inlet 3.5 m/s.....	29
Gambar 2.14	Grafik laju penguapan kecepatan inlet 5 m/s.....	30
Gambar 2.15	Kontur Kecepatan dengan variasi porositas	31
Gambar 3.1	Geometri 2D Pemodelan <i>Fluidized Bed Coal Dryer</i>	35
Gambar 3.2	Geometri 2D Variasi Susunan Batubara pada <i>Drying Chamber</i>	36

Gambar 3.3	<i>Meshing dan boundary condition pada Drying Chamber (2D-flow)</i>	37
Gambar 3.4	Trend Grafik Hasil Iterasi.....	43
Gambar 3.5	<i>Flowchart metodologi penelitian</i>	45
Gambar 3.5	<i>Flowchart metodologi perhitungan</i>	46
Gambar 4.1	Kontur Temperatur pada variasi Temperatur Inlet 316 K (a)Susunan 1 (b)Susunan 2 (c)Susunan 3..	56
Gambar 4.2	<i>Kontur Temperatur pada variasi Temperatur Inlet 327 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2</i>	59
Gambar 4.3	<i>Kontur Temperatur pada variasi Temperatur Inlet 339 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2</i>	61
Gambar 4.4	<i>Kontur Fraksi Massa H₂O pada variasi Temperatur Inlet 316 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2</i>	63
Gambar 4.5	<i>Kontur Fraksi Massa H₂O pada variasi Temperatur Inlet 327 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2</i>	65
Gambar 4.6	<i>Kontur Fraksi Massa H₂O pada variasi Temperatur Inlet 339 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2</i>	67
Gambar 4.7	<i>Laju pengurangan moisture content pada variasi Susunan Teratur, Acak 1, serta Acak 2 (a) Temperatur 316 K (b) Temperatur 327 K (c) Temperatur 339 K</i>	69
Gambar 4.8	<i>Hubungan Moisture Content pada Batubara dengan Waktu</i>	70
Gambar 4.9	<i>Posisi pengambilan data input untuk psychometric chart</i>	72

Gambar 4.10 *Diagram Psikometrik gabungan untuk ketiga variasi temperatur (a)Temperatur 316 K (b)Temperatur327K(c) Temperatur 339K..... 74*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan pesatnya perkembangan ekonomi, pencarian terhadap suatu sistem energi yang ramah lingkungan dan efisien mengharuskan kita untuk melihat sumber energi lain selain minyak dan gas bumi. Penggunaan batubara sebagai sumber energi utama juga semakin hari semakin meningkat di beberapa negara terutama sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik, industri semen, dan industri-industri lainnya. Sesuai dengan kebijaksanaan pemerintah tentang penganekaragaman atau diversifikasi energi, batubara merupakan alternatif energi pengganti minyak bumi dan gas untuk masa kini maupun masa-masa mendatang.

Indonesia mempunyai sumber daya batubara yang cukup besar, yaitu mencapai 105,7 milyar ton. Sebagian besar sumber daya tersebut termasuk ke dalam batubara peringkat rendah berupa lignit dan sub-bituminus. Tingginya kadar air menyebabkan rendahnya nilai kalor, sehingga pemanfaatan batubara jenis ini menjadi terbatas dan sulit untuk dipasarkan, terutama menyangkut masalah transportasi. Harga jual batubara peringkat rendah sangat murah dan tidak ekonomis untuk diekspor. Dilain pihak, pemanfaatan batubara peringkat rendah perlu untuk terus ditingkatkan sebagai upaya pemenuhan energi di dalam negeri dan sebagai sumber devisa. Sedangkan penggunaan batubara dengan nilai kalori tinggi dan sangat tinggi hampir seluruhnya diekspor, batubara kalori sedang sebagian digunakan untuk konsumsi energi dalam negeri dan sebagian diekspor. Berikut tabel sebaran produksi batubara di Indonesia sampai saat ini :

Tabel 1.1 Persebaran produksi batubara Indonesia tahun 2004-2012[2]

Tahun	Produksi	Ekspor	Impor	Ton
				Dalam Negeri
2004	132.352.025	93.758.806	97.183	36.081.734
2005	152.722.438	110.789.700	98.179	41.350.736
2006	193.761.311	143.632.865	110.683	48.995.069
2007	216.946.699	163.000.000	67.534	61.470.000
2008	240.249.968	191.430.218	106.931	53.473.252
2009	256.181.000	198.366.000	68.804	56.295.000
2010	275.164.196	208.000.000	55.230	67.000.000
2011	353.387.341	272.671.351	42.449	79.557.800
2012*	76.816.644	50.262.819		24.690.385

Sumber : Direktorat Jenderal Mineral Batubara, Diolah Pusdatin

* Sementara

Berikut adalah distribusi cadangan batubara di wilayah-wilayah Indonesia beserta jenis kualitasnya :

Tabel 1.2 Persebaran produksi batubara seluruh Indonesia

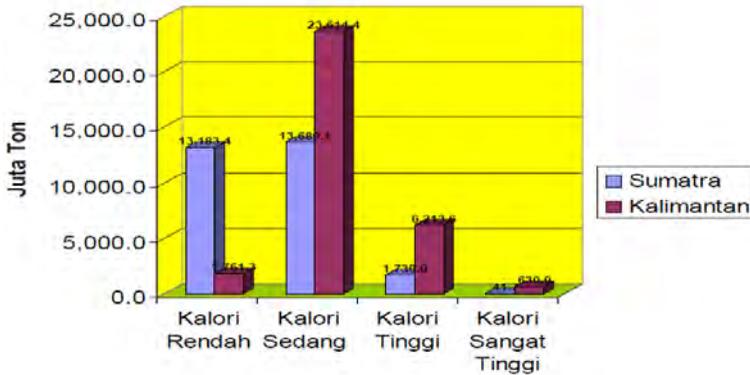
No.	Provinsi	Kualitas		Sumberdaya (Juta Ton)				Cadangan (Juta Ton)	
		Kelas	Kriteria (Kal/gr. adb)	Hipofelik	Teraka	Tartunjuk	Tarukur		Jumlah
9	BENGGKULU	Kalori Rendah	<5100	0,00	11,34	0,00	10,58	21,92	0,00
		Kalori Sedang	5100 - 6100	0,00	0,81	0,00	5,86	6,67	3,79
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	15,15	100,62	8,11	45,49	169,37	17,33
		Kalori Sangat Tinggi	> 7100	0,00	0,32	0,00	0,37	0,69	0,00
				16,16	113,09	8,11	62,30	198,66	21,12
10	SUMATERA SELATAN	Kalori Rendah	<5100	326,55	7.400,27	2.300,07	1.358,00	11.384,89	2.426,00
		Kalori Sedang	5100 - 6100	198,93	1.629,28	9.139,87	366,01	11.334,10	186,00
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	0,00	31,00	433,89	14,00	478,89	67,00
						525,48	9.060,55	11.873,93	1.738,01
11	LAMPUNG	Kalori Sedang	5100 - 6100	0,00	14,00	0,00	0,00	14,00	0,00
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	0,00	92,95	0,00	0,00	92,95	0,00
				0,00	106,95	0,00	0,00	106,95	0,00
12	KALIMANTAN BARAT	Kalori Tinggi	6100 - 7100	42,12	378,60	0,00	0,00	420,72	0,00
		Kalori Sangat Tinggi	> 7100	0,00	104,00	1,32	1,48	106,80	0,00
						42,12	482,60	1,32	1,48
13	KALIMANTAN TENGAH	Kalori Rendah	<5100	0,00	483,92	0,00	0,00	483,92	0,00
		Kalori Sedang	5100 - 6100	0,00	296,75	5,08	46,36	354,80	4,05
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	114,11	262,72	0,00	72,64	449,47	0,00
		Kalori Sangat Tinggi	> 7100	0,00	247,62	0,00	77,02	324,64	44,54
				114,11	1.291,01	5,08	194,02	1.612,83	48,59
14	KALIMANTAN SELATAN	Kalori Rendah	<5100	0,00	370,87	0,00	600,99	971,86	536,33
		Kalori Sedang	5100 - 6100	0,00	4.793,13	301,36	2.526,46	7.620,95	1.287,01
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	0,00	336,19	33,12	109,64	478,95	44,36
		Kalori Sangat Tinggi	> 7100	0,00	17,62	0,00	12,00	29,62	0,14
				0,00	5.517,81	334,48	3.249,09	9.101,38	1.567,84

No.	Propinsi	Kualitas		Sumberdaya (Juta Ton)					Cadangan (Juta Ton)
		Kelas	Kriteria (Kal/gr. aab)	Hipoteetik	Tereka	Tertunjuk	Terukur	Jumlah	
15	KALIMANTAN TIMUR	Kalori Rendah	<5100	0,00	201,93	13,76	89,83	305,52	0,00
		Kalori Sedang	5100 - 6100	2.265,84	10.630,35	121,61	2.609,46	15.682,72	741,62
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	502,96	2.611,07	191,77	1.558,62	4.918,92	1.064,82
		Kalori Sangat Tinggi	> 7100	90,11	60,84	4,48	14,40	169,82	65,24
				2.878,90	13.504,19	331,62	4.272,31	21.076,98	2.071,68
16	SULAWESI SELATAN	Kalori Sedang	5100 - 6100	0,00	131,03	32,31	53,10	216,44	0,04
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	0,00	13,90	0,78	0,00	14,68	0,00
						0,00	144,93	33,09	53,10
17	SULAWESI TENGAH	Kalori Rendah	<5100	0,00	1,98	0,00	0,00	1,98	0,00
						0,00	1,98	0,00	0,00
18	MALUKU UTARA	Kalori Rendah	<5100	0,00	2,13	0,00	0,00	2,13	0,00
						0,00	2,13	0,00	0,00
19	PAPUA BARAT	Kalori Sedang	5100 - 6100	89,40	30,95	0,00	0,00	120,35	0,00
		Kalori Tinggi	6100 - 7100	0,00	5,38	0,00	0,00	5,38	0,00
		Kalori Sangat Tinggi	> 7100	0,00	25,53	0,00	0,00	25,53	0,00
						89,40	61,84	0,00	0,00
JUMLAH SUMBERDAYA BATUBARA TIAP PROPINSI				3.899,22	34.320,97	12.679,98	10.371,74	61.365,84	6.758,90



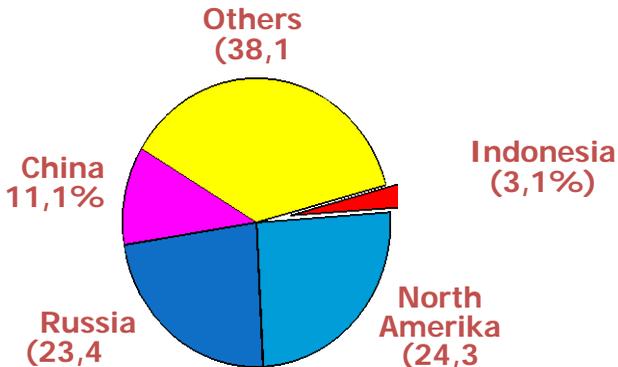
Gambar 1.1 Persebaran batubara di wilayah Indonesia berdasarkan nilai kalori

Dilihat dari tabel diatas, cadangan batubara Indonesia paling banyak tersebar di Sumatera (50,06%) dan Kalimantan (49,56%), sedangkan sebagian kecil terdapat di Jawa, Sulawesi, dan Papua.



Gambar 1.2 Persebaran batubara Kalimantan dan Sumatera berdasarkan nilai kalori

Sampai 2014 mendatang, hampir 70% produksi batubara Indonesia diekspor. Padahal, cadangan batu bara Indonesia tidak banyak, hanya sekitar 3% dari cadangan dunia. Jumlah cadangan batubara Indonesia saat ini cuma 3% dari jumlah cadangan dunia.



Gambar 1.3 Diagram persebaran batubara dunia

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mengungkapkan bahwa dari sekitar 371 juta ton produksi batu

bara Indonesia sepanjang 2011 lalu, 78 persen penjualannya masih didominasi pasar luar negeri, sedangkan pasar domestik baru menyerap sekitar 22 persen.

Pemerintah juga telah mengeluarkan Permen ESDM nomor 34 tahun 2009 tentang Pengutamaan Pemasokan Kebutuhan Mineral dan Batubara untuk Kepentingan Dalam Negeri atau lebih dikenal *Domestic Market Obligation* (DMO) untuk meminimalisir tingginya ekspor batubara, Lewat aturan tersebut, kebutuhan dalam negeri bisa diprioritaskan dan meningkatkan kadar batubara berkualitas rendah (low rank coal) agar lebih memiliki nilai tambah. Oleh karena itu, perlu ada pengembangan teknologi agar dapat memanfaatkan batubara di Indonesia dengan lebih baik lagi.

1.2 Rumusan Masalah

Indonesia mempunyai sumber daya batubara yang cukup besar, sebagian besar sumber daya tersebut yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri termasuk ke dalam batubara peringkat rendah berupa lignit dan sub-bituminus yang memiliki kandungan air yang cukup tinggi. Dengan kandungan air yang tinggi, maka batubara tersebut akan mudah lengket satu sama lain yang kemudian akan menggumpal saat batubara tersebut dialirkan bersama-sama. Selain itu tingginya kadar air menyebabkan rendahnya nilai kalor, sehingga pemanfaatan batubara peringkat rendah perlu untuk terus ditingkatkan sebagai upaya pemenuhan energi di dalam negeri dan sebagai sumber devisa Negara. Dengan adanya teknologi pengeringan dapat meningkatkan nilai kalor dari batubara kalori rendah tersebut. Dalam laporan ini akan membahas proses evaporasi pada batubara dengan metode numerik.

1.3 Batasan Penelitian

Batasan-batasan masalah yang diambil dalam analisa ini adalah sebagai berikut :

- Permasalahan hanya dibatasi pada *drying chamber*.
- Pemodelan ruang pengering hanya dalam bentuk 2 dimensi.
- Proses pengeringan menggunakan metode *discrete*, dimana proses running pada software Fluent 6.3.26 dilakukan secara bertahap
- Proses pengeringan hanya terjadi pada permukaan batubara.
- Mengabaikan proses perpindahan massa secara difusi pada batubara.
- Mengidentifikasi mass fraction di surface dengan moisture content.
- Dinding ruang pengering diisolasi dengan sempurna.
- Mekanisme perpindahan panas secara *steady state*.
- Analisa laju pengering dalam kondisi steady state.
- Udara pengering diasumsikan sebagai gas ideal.
- Letak *tube heater* tidak berubah dalam *drying chamber*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan ini adalah :

- Mengetahui laju penguapan batubara dan waktu pengeringan dengan perbandingan volume *chamber* dan volume batubara sebesar 50 %
- Mengetahui hubungan laju pengupan dengan variasi temperatur udara pengering.
- Mengetahui pengaruh adanya pemanasan tambahan oleh *tube* sebagai *heater* dalam proses pengeringan

batubara yang diwujudkan dalam diagram psikometrik.

1.5 Manfaat Laporan

Manfaat dari penulisan ini adalah :

- Membantu meningkatkan nilai efisiensi dari konsumsi batubara.
- Mengetahui pendekatan untuk keakuratan perhitungan dengan menggunakan simulasi numerik.
- Memberikan pandangan bahwa simulasi numerik memberikan kemudahan pengoperasiannya untuk mendapatkan data yang lain, dimana eksperimen tidak bisa menyediakannya.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut

- **BAB I PENDAHULUAN**, Bab ini berisi tentang latar belakang dari penelitian ini, perumusan masalah, batasan masalah dan tujuan penelitian dari penelitian, manfaat dari penelitian yang dilakukan, dan sistematika laporan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**, Bab ini dibagi menjadi 2 bagian, yaitu dasar teori dan penelitian terkait yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang menunjang dalam penganalisaan hasil penelitian. Sedangkan penelitian terkait yang sudah ada berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang ada korelasinya dengan penelitian kali ini, yang juga menjadi penunjang dalam analisa data.
- **BAB III METODE PENELITIAN**, Bab ini menerangkan tentang langkah-langkah pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak Fluent 6.3.26 serta flowchart perhitungannya.

- **BAB IV ANALISA DAN DISKUSI**, Bab ini berisi tentang hasil-hasil numerik (*post processing*) kualitatif dan kuantitatif dari perangkat lunak *Fluent 6.3.26* berupa kontur, contoh perhitungan, grafik yang sudah dihitung kemudian dianalisa dan didiskusikan lebih lanjut.
- **BAB V PENUTUP**, Bab penutup ini terdiri dari 2 sub bab, yaitu kesimpulan dari hasil numerik (*post processing*) dan saran yang perlu diberikan.

BAB II

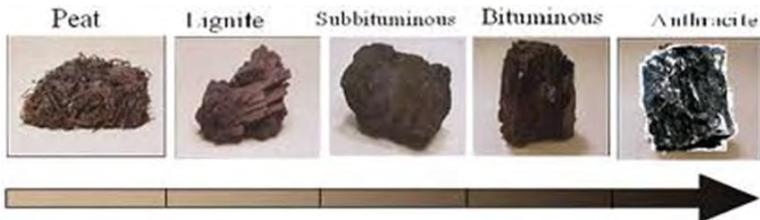
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Batubara dan Jenisnya

Batubara adalah salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, utamanya adalah sisa-sisa tumbuhan dan terbentuk melalui proses pematubaraan. Proses pematubaraan adalah proses perubahan sisa-sisa tanaman menjadi gambut hingga batu bara. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen. Batu bara juga adalah batuan organik yang memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk.

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas dan waktu, batu bara umumnya dibagi dalam lima kelas: antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.



Gambar 2.1 Jenis-jenis Batubara

- **Antrasit** adalah kelas batu bara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (*luster*) metalik, mengandung antara 85% - 98% unsur karbon (C) dengan kadar air kurang dari 15%.
- **Bituminus** mengandung 45 - 85% unsur karbon (C) dan berkadar air 2-15% dari beratnya..

- **Sub-bituminus** mengandung sedikit karbon dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.
- **Lignit** atau batu bara coklat adalah batu bara yang sangat lunak yang mengandung air 30-60% dari beratnya.
- **Gambut**, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah.

Tabel 2.1 Properties Batubara

% weight	Anthracite	Bituminous	Sub-Bituminous	Lignite
Heat Content (Btu/lb)	13,000-15,000	11,000-15,000	8,500-13,000	4,000-8,300
Moisture	< 15%	2 - 15%	10 - 45%	30 - 60%
Fixed Carbon	85 - 98%	45 - 85%	35 - 45%	25 - 35%
Ash	10 - 20%	3 - 12%	≤ 10%	10 - 50%
Sulfur	0.6 - 0.8%	0.7 - 4.0%	< 2%	0.4 - 1.0%

Umumnya cadangan batubara yang terdapat di Indonesia, tergolong berumur tersier, yang terbentuk sekitar 65 juta tahun lalu. Sebagian besar (83%) produk tambang batubara Indonesia termasuk tipe batubara muda (brown coal) yang termasuk katagori Lignit sampai Sub Bituminous, sebagian kecil (<20%) termasuk katagori Bituminous dan Antracite.

Batubara Indonesia dikenal memiliki kadar abu dan kadar belerang yang rendah. Sehingga dengan sifat-sifatnya itu, sebagian besar batubara Indonesia lebih cocok digunakan untuk bahan bakar, atau *steam coal*, yang kadar polusinya relatif rendah.

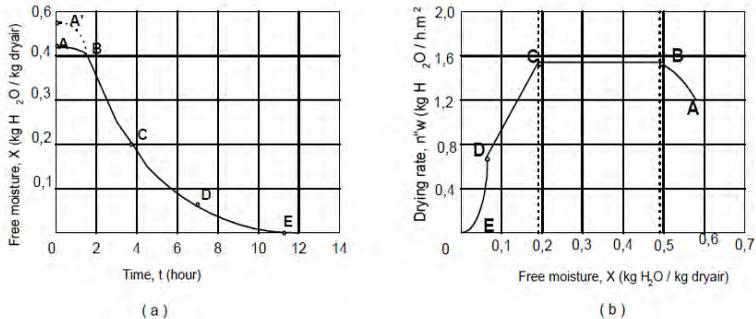
2.1.2 Proses Pengeringan

Pengeringan adalah proses pengeluaran air atau pemisahan air dalam jumlah yang relatif kecil dari bahan dengan

menggunakan energi panas. Tujuan umum dari pengeringan adalah mengurangi kadar air pada batubara agar batubara dapat digunakan dengan lebih efektif. Proses yang dilakukan adalah dengan cara menaikkan tekanan parsial uap air pada batubara dengan memberbatubara panas dan menaikkan kelembaban relatif udara pengering. Pengertian proses pengeringan berbeda dengan proses penguapan (evaporasi). Proses penguapan atau evaporasi adalah proses pemisahan uap air dalam bentuk murni dari suatu campuran berupa larutan (cairan) yang mengandung air dalam jumlah yang relatif banyak. Meskipun demikian ada kerugian yang ditimbulkan selama pengeringan yaitu terjadinya perubahan sifat fisik dan kimiawi bahan serta terjadinya penurunan mutu bahan.

Proses pengeringan pada prinsipnya menyangkut proses pindah panas dan pindah massa yang terjadi secara bersamaan (simultan). Proses perpindahan panas yang terjadi adalah dengan cara konveksi serta perpindahan panas secara konduksi dan radiasi tetap terjadi dalam jumlah yang relatif kecil. Pertama-tama panas harus ditransfer dari medium pemanas ke bahan. Selanjutnya setelah terjadi penguapan air, uap air yang terbentuk harus dipindahkan melalui struktur bahan ke medium sekitarnya. Proses ini akan menyangkut aliran fluida dengan cairan harus ditransfer melalui struktur bahan selama proses pengeringan berlangsung. Panas harus disediakan untuk menguapkan air dan air harus mendifusi melalui berbagai macam tahanan agar dapat lepas dari bahan dan berbentuk uap air yang bebas. Lama proses pengeringan tergantung pada bahan yang dikeringkan dan cara pemanasan yang digunakan, sedangkan waktu proses pengeringannya ditetapkan dalam tiga periode (**Batty dan Folkman. 1984**) [3], yaitu:

- a) Periode laju pengeringan naik
- b) Periode laju pengeringan konstan
- c) Periode pengeringan menurun



Keterangan :

- A - B : periode pemanasan
- B - C : periode laju pengeringan konstan
- C - D : periode laju pengeringan menurun pertama
- C : kadar air kritis
- D - E : periode laju pengeringan menurun kedua

Grafik 2.2 Periode Proses Pengeringan

a. Periode Laju Pengeringan Menaik

Sesaat setelah bahan menerima panas dari udara pengering yang panas, maka temperatur batubara akan naik hingga mencapai kesetimbangan dengan temperatur wet bulb udara (T_{wb}). Kurva akan naik (A-B), bila temperatur awal batubara lebih rendah daripada temperatur wet bulb udara pengering. Kurva akan turun (A' -B) bila temperatur awal batubara lebih tinggi daripada temperatur wet bulb udara pengering. Bila temperatur awal batubara sama dengan T_{wb} udara pengering maka kurva periode ini tidak ada.

b. Periode Laju Pengeringan Konstan

Pada periode ini (B - C) permukaan bahan jenuh dengan uap air, temperatur uap air pada permukaan sama dengan T_{wb} udara pengering. Selama proses ini berlangsung kecepatan aliran air dari dalam bahan sama dengan kecepatan air yang diuapkan.

Proses ini berakhir bila kadar air bebas bahan mencapai titik kritis (*critical moisture content*). Kadar air kritis adalah kadar air bebas terendah saat laju kecepatan air bebas ke permukaan sama dengan laju penguapan. Pada periode ini proses pengeringan bergantung pada faktor eksternal seperti laju aliran udara dan temperatur udara pengering.

c. Periode Laju Pengeringan Menurun

Titik C pada gambar adalah kadar air bebas kritis. Pada titik ini air pada permukaan tidak mencukupi untuk mempertahankan lapisan air yang kontinyu. Seluruh permukaan batubara akan terus mengering sampai seluruh permukaan batubara kering pada titik D. Pada fase kedua laju pengeringan menurun yang dimulai pada titik D saat seluruh permukaan batubara telah kering, panas yang tersedia digunakan untuk menguapkan air pada batubara dan selanjutnya karena perbedaan konsentrasi antara dalam dan permukaan maka air tersebut akan bergerak ke permukaan. Jumlah cairan yang diuapkan pada periode ini relatif kecil dan waktu yang diperlukan relatif lama.

2.1.3 Prinsip Perpindahan Massa

Perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering yang terjadi selama proses pengeringan, yaitu :

- 1) Perpindahan uap air dari dalam ke permukaan batubara.

Gerakan perpindahan air ini terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi. Konsentrasi air pada bagian dalam material lebih besar daripada konsentrasi air pada bagian permukaan. Dengan menganggap suatu lapisan tipis, gerakan uap air dari material ke permukaan dapat ditentukan dengan persamaan Fick untuk difusi satu dimensi.

$$N_{wf}^n = -D_{AB} \cdot \left(\frac{\delta C_w}{\delta X} \right) \quad (2.1)$$

$$n_{wf}^n = -D_{AB} \cdot \left(\frac{\delta \rho_w}{\delta X} \right) \quad (2.2)$$

dimana

$$N_{wf,x}^n = \text{fluks molar uap air (kg mol/s.m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned}
 n''_{wf,x} &= \text{fluks massa uap air} \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right) \\
 D_{AB} &= \text{koefisien difusi binary dari material} \left(\frac{m^2}{s} \right) \\
 \frac{\delta C_w}{\delta X} &= \text{perbedaan konsentrasi uap air dalam arah x} \\
 &\left(\frac{kg \cdot mol}{m^4} \right) \\
 \frac{\delta \rho_w}{\delta X} &= \text{perbedaan rapat massa uap air dalam arah x} \\
 &\left(\frac{kg \cdot mol}{m^4} \right)
 \end{aligned}$$

2) Perpindahan uap air dari permukaan batubara ke udara pengering.

Perpindahan uap air dari permukaan material ke udara pengering dalam proses pengeringan berlangsung secara konveksi. Laju perpindahan uap airnya ditentukan dengan persamaan :

$$N''_A = h_m \cdot (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (2.3)$$

$$n''_A = h_m \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.4)$$

dimana :

$$h_m = \text{koefisien konveksi perpindahan massa} \left(\frac{m}{s} \right).$$

$$C_{A,s} = \text{konsentrasi uap air di permukaan material} \\ \left(\frac{kg \cdot mol}{m^3} \right).$$

$$C_{A,\infty} = \text{konsentrasi uap air di medium pengering} \\ \left(\frac{kg \cdot mol}{m^3} \right).$$

$$\rho_{A,s} = \text{rapat massa uap air di permukaan material} \\ \left(\frac{kg}{m^3} \right).$$

$$\rho_{A,\infty} = \text{rapat massa uap air di medium pengering} \left(\frac{kg}{m^3} \right).$$

2.1.4 Analogi Perpindahan Panas dengan Perpindahan Massa

Analogi antara perpindahan panas dan perpindahan massa bisa digunakan secara langsung untuk menghubungkan antara dua koefisien konveksi yang saling simultan saat terjadi perpindahan panas dan perpindahan massa.

Bilangan Nusselt adalah gradien temperatur *dimensionless* pada permukaan, dirumuskan

$$Nu_L = \frac{hL}{k} \quad (2.5)$$

Bilangan Sherwood merupakan gradien konsentrasi *dimensionless* pada permukaan, dirumuskan

$$Sh_L = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad (2.6)$$

Bilangan Prandtl adalah perbandingan antara momentum dan difusivitas panas, dituliskan

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.7)$$

Bilangan Schmidt merupakan perbandingan antara momentum dan difusivitas massa, dirumuskan

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2.8)$$

Nu dan Sh sebanding dengan Pr^n dan Sc^n (**Incropera & De Witt, 2002**) [4] dituliskan sebagai :

$$Nu = f(x^*, Re_L) Pr^n \text{ dan } Sh = f(x^*, Re_L) Sc^n \quad (2.9)$$

- Koefisien Perpindahan Massa secara Konveksi (h_m)

Dalam mengolah data pada bab IV, nilai koefisien perpindahan massa (h_m) didapatkan dari persamaan :

$$h_m = \frac{h \times D_{AB} \times L_e^n}{k} \quad (2.10)$$

Dimana Le^n yang merupakan perbandingan antara *thermal diffusivities* dan *mass diffusivities*, seperti perumusan di bawah ini :

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (2.11)$$

- Laju Flux Massa atau Laju Pengeringan (n_A'')

Dari nilai h_m yang telah didapatkan, selanjutnya dapat dicari nilai laju pengeringan dan laju perpindahan panas yang terjadi selama proses pengeringan batubara dalam ruang pengering, yaitu :

$$n_A'' = h_m \times (\rho_{H_2O, coal} - \rho_{H_2O, inlet}) \quad (2.12)$$

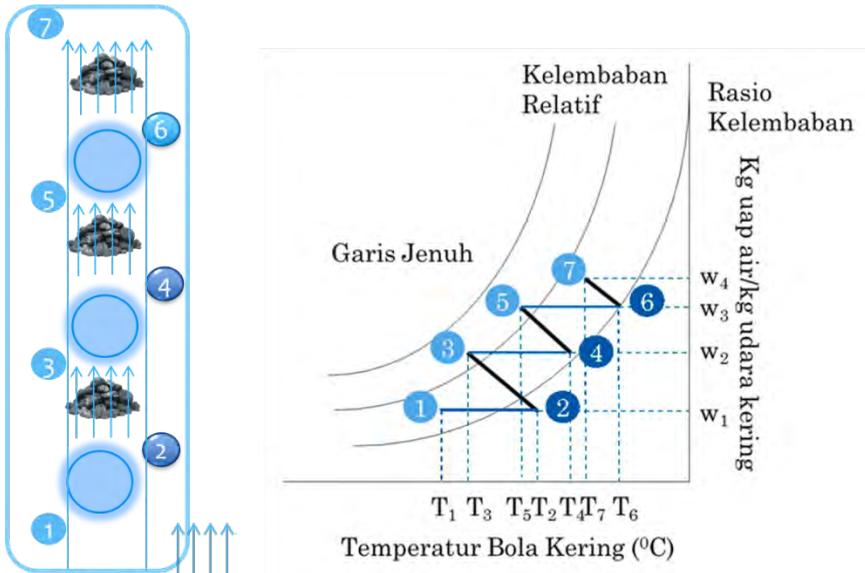
$$n_A = n_A'' \times Ax \ 100 \quad (2.13)$$

Dimana :

h	= heat transfer coefficient ($W/m^2.K$)
h_m	= mass transfer coefficient (m/s)
k	= thermal conductivity ($W/m.K$)
D_{ab}	= Diffusivity (m^2/s)
C_p	= specific heat ($J/kg.K$)
α	= Thermal diffusivity (m^2/s)

2.1.5 Prinsip Psikometri

Psikometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dengan uap air yang mempunyai arti penting dalam proses pengeringan, karena udara pada atmosfer tidak kering tetapi mengandung sejumlah uap. Pada gambar dibawah ditunjukkan Diagram Psikometri yang menunjukkan proses pengeringan pada T_{wb} konstan.



Gambar 2.3 *Prinsip Pengeringan pada Psikometrik Chart*
Titik 2–3 menunjukkan udara ketika memasuki ruangan pengeringan dan berinteraksi dengan lapisan batubara. Di antara titik 2 dan 3, udara menyerap air dari lapisan batubara pada temperatur wet bulb (Twb) konstan, sehingga terjadi penurunan temperatur bola kering dan terjadi kenaikan rasio kelembaban, kelembaban relatif, tekanan parsial uap air dan suhu titik embun.

➤ **Kelembaban relatif**

Kelembaban relatif adalah perbandingan untuk fraksi molekul uap air (tekanan uap air) di dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh (tekanan jenuh uap air) pada temperatur dry bulb dan tekanan yang sama. Dari hubungan untuk gas ideal, kelembaban relatif dapat dinyatakan dengan θ , yaitu :

$$\theta = \frac{P_{\text{uap}}}{P_s} \quad (2.14)$$

dimana :

P_{uap} = tekanan uap air

P_s = tekanan jenuh uap air pada temperatur yang sama

➤ **Rasio Kelembaban**

Rasio kelembaban (W_{ud}) adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Rasio kelembaban udara ditentukan berdasarkan 1 kg udara kering, seperti beberapa sifat yang akan dipelajari.

$$W_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ud}} \quad (2.15)$$

Dimana :

W_{ud} = Rasio kelembaban H_2O (kg/kg)
 m_{H_2O} = massa uap air (H_2O) yang terkandung (kg H_2O)
 m_{ud} = massa udara kering (kg udara kering)

➤ **Fraksi massa**

Fraksi massa didefinisikan batubara sebagai perbandingan antara berat (kilogram) suatu zat terhadap 1 kilogram *mixture*. Dirumuskan :

$$Y_{H_2O} = \frac{kg H_2O}{kg H_2O + kg X} \quad (2.16)$$

➤ **Massa H₂O pada Inlet**

Dengan asumsi massa udara yang masuk ke *dryer chamber* adalah 1 kg, maka untuk mengetahui massa uap air yang terkandung dalam udara tersebut adalah :

$$m_{H_2O, inlet} = \text{massa udara}_{inlet} \cdot Y_{H_2O} \quad (2.17)$$

➤ **Massa H₂O pada Outlet**

Massa udara yang keluar dari *drying chamber* adalah sama dengan massa udara yang masuk, karena berlaku hukum konservasi massa. Sehingga massa uap air pada outlet adalah :

$$m_{H_2O, outlet} = \text{massa udara}_{outlet} \cdot Y_{H_2O} \quad (2.18)$$

➤ **Massa H₂O yang dibawa oleh Udara Pengering**

Untuk mendapatkan banyaknya massa H₂O yang dibawa oleh udara pengering dari batubara yang dilewatinya adalah :

$$\Delta m_{H_2O} = m_{H_2O, outlet} - \text{massa}_{H_2O, inlet} \quad (2.19)$$

➤ **Massa H₂O pada Permukaan Batubara Awal**

Dengan asumsi batubara yang diumpankan ke *drying chamber* adalah sebesar 1 kg batubara, maka massa air yang terkandung dalam batubara adalah :

$$m_{H_2O, coal} = Y_{H_2O, coal} \cdot \text{massa batubara} \quad (2.20)$$

➤ **Massa H₂O pada Permukaan Batubara Akhir**

Perumusan yang digunakan untuk menghitung banyaknya kandungan H₂O di dalam batubara pada proses akhir adalah :

$$m_{H_2O, coal akhir} = m_{H_2O, coal} - \Delta m_{H_2O} \quad (2.21)$$

➤ **Waktu Pengeringan (t)**

Waktu yang dibutuhkan untuk mengeringkan batubara dalam sekali proses didapatkan dengan menggunakan perumusan sebagai berikut :

$$\dot{t} = \frac{\Delta m_{H_2O}}{n_A} \quad (2.22)$$

Pada diagram Psikometrik, dikenal 8 proses yang dialami oleh udara, yaitu:

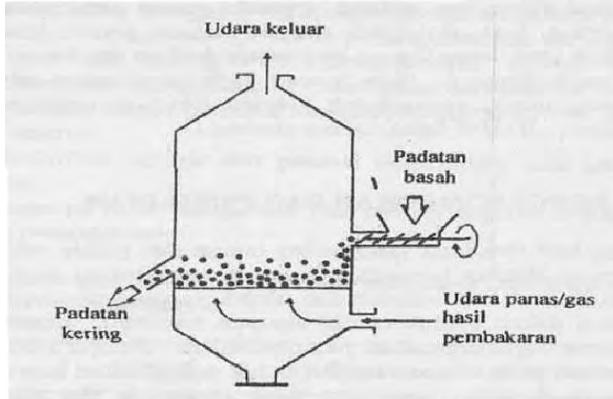
- ✚ Proses pemanasan (*Heating*).
- ✚ Proses pendinginan (*Cooling*).
- ✚ Proses pelembaban (*Humidifying*).
- ✚ Proses penurunan kelembaban (*Dehumidifying*).
- ✚ Proses pemanasan dan pelembaban (*Heating and humidifying*).
- ✚ Proses pemanasan dan penurunan kelembaban (*Heating and dehumidifying*).
- ✚ Proses pendinginan dan pelembaban (*Cooling and humidifying*).
- ✚ Proses pendinginan dan penurunan kelembaban (*Cooling and dehumidifying*).

2.2 Fluidized Bed Coal Dryer

Terdapat beberapa teknologi pengeringan yang dikenal di dunia industri. Pemakaian jenis teknologi pengeringan disesuaikan dengan parameter proses dan produk. Teknologi Fluidized Bed Coal Dryer adalah salah satu teknologi pengeringan yang digunakan dalam proses pengeringan di sektor industri. Teknologi Fluidized Bed Coal Dryer dikenal sebagai teknologi pengeringan dengan efisiensi dan penggunaan energi yang relatif baik. Secara umum teknologi Fluidized Bed Coal Dryer banyak digunakan dalam pengeringan batubara untuk mengurangi kandungan air di dalamnya. Fluidized bed dryer adalah sistem pengeringan yang diperutukan bagi bahan berbobot relatif ringan, misalnya serbuk dan ganular.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam sistim fluidized bed dryer adalah pengaturan yang baik antara tekanan udara, tingkat perpindahan panas dan waktu pengeringan, sehingga tidak terjadi gesekan bahan saat proses pengeringan berlangsung. Penentuan dimensi ruang bakar, suhu yang diaplikasbatubara serta volume dan tekanan udara sangat menentukan keberhasilan proses pengeringan, sehingga perlu diketahui data pendukung untuk

merancang sistem ini diantaranya kadar air input, kadar air output, kepadatan dan ukuran bahan, panas maksimum yang diizinkan serta sifat fisika kimianya, kapasitas output/input dan sebagainya.



Gambar 2.4 Sistem Fluidized Bed Dryer

Prinsip kerja pengering pengering tipe *fluidized bed dryer* adalah penghambusan udara panas oleh kipas peniup (blower) melalui suatu saluran ke atas bak pengering yang menembus hamparan bahan sehingga bahan tersebut dapat bergerak dan memiliki sifat seperti fluida. Pada tingkat kecepatan udara panas yang kurang dari kecepatan fluidasi maka produk pada posisi diam dan apabila melebihi kecepatan fluidisasi akan terjadi slugging atau turbulensi pada produk yang dikeringkan sehingga lewat proses tersebut, proses perpindahan massa akan lebih efektif.

Pada penelitian ini, akan menggunakan dryer dengan tipe Fluidized Bed karena Fluidized Bed memiliki kelebihan sebagai berikut :

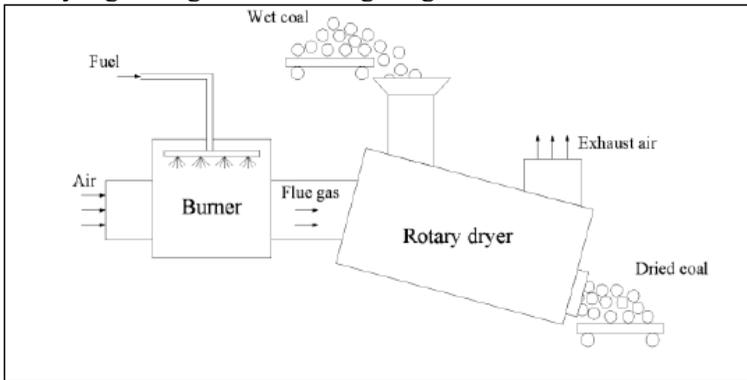
- Alat ini dapat digunakan untuk sistem yang kontinyu.
- Fluidized Bed merupakan tipe yang sesuai untuk material yang berbentuk granular.
- Pengeringan yang cepat membutuhkan waktu yang cepat.

- Perpindahan panas dan kontrol terhadap ukuran partikelnya lebih baik.

2.3 Kajian Terdahulu

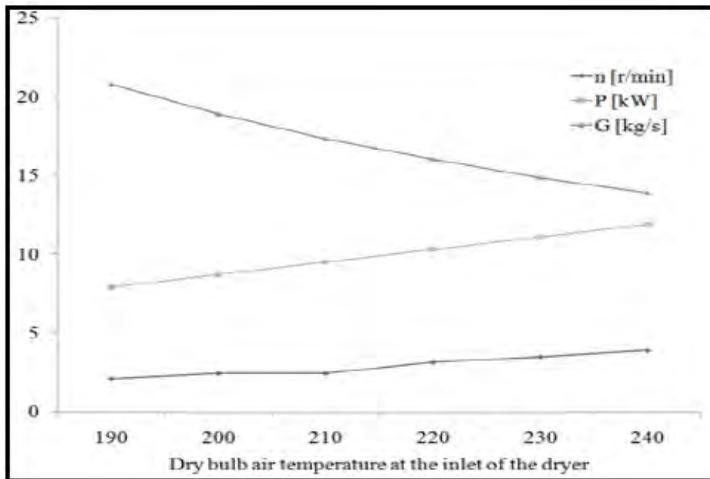
2.2.1 M. Zeki Yilmazoglu (2011)

Model yang dirancang oleh **M. Zeki Yilmazoglu**[10] merupakan sebuah rotary dryer, dimana burner digunakan gas alam sebagai bahan bakar untuk mengeringkan udara, sehingga udara yang kering ini akan mengeringkan batubara.



Gambar 2.5 Skema Rotary Dryer

Drying ini merupakan tipe direct contact yang akan mengambil kandungan air dalam batubara. Flue gas memasuki dryer dengan humidity ratio 20% dan laju massa $3,7 \text{ kg/ms}^2$. Batubara diumpankan dengan laju massa 12 t/h. Lama proses pengeringan adalah 0.3 h.



Grafik 2.6 Pengaruh Temperatur terhadap Proses Pengeringan pada Rotary Dryer

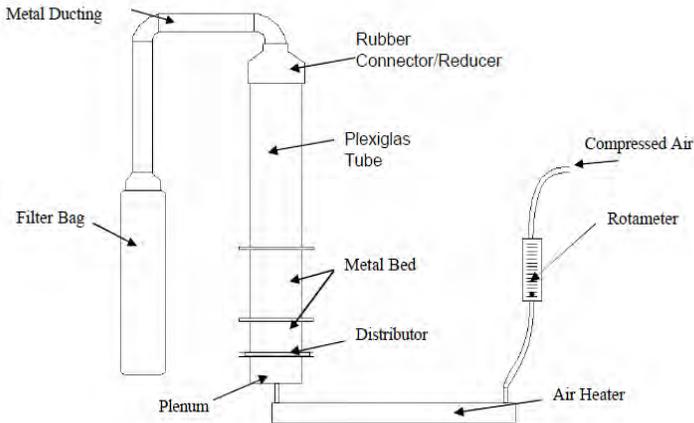
Pada grafik diatas didapatkan bahwa untuk menghasilkan proses pengeringan yang sama maka dilakukan variasi yang berhubungan dengan udara pengering, daya pada *bed dryer*, dan kecepatan rotasi *bed dryer*.

2.2.2 Levy dkk (2006)

Penelitian terkait dengan teknologi pengeringan batubara pernah dilakukan oleh Levy dkk (2006) [5]. Dalam penelitiannya yang berjudul “Use Of Coal Drying To Reduce Waterconsumed In Pulverized Coal Power Plants” levy melakukan penelitian terhadap efek pengeringan batubara dalam upaya untuk mengurangi kandungan air dalam batubara.

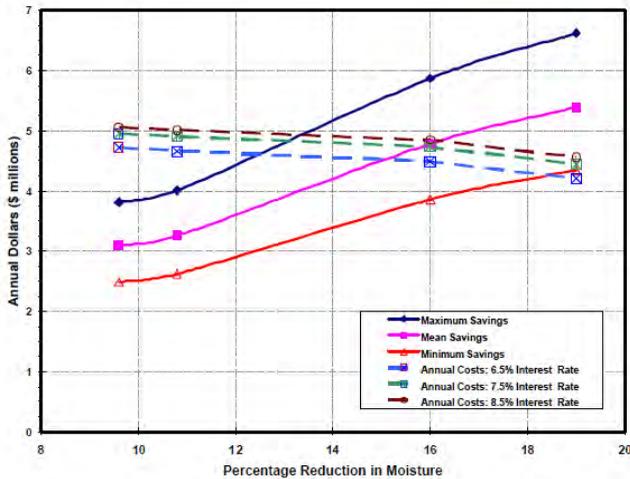
Dalam penelitiannya Levy dkk (2006) [5] merancang sebuah peralatan eksperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara. Pengujian alat eksperimen dilakukan dalam naungan Riset Energi Center Fluidized Bed Laboratory. Ruang pengeringan bertipe *fluidized bed* dengan diameter 6

inci. Udara pemanas dirancang mencapai suhu 150° F dengan kecepatan mencapai 1.6 m/s.



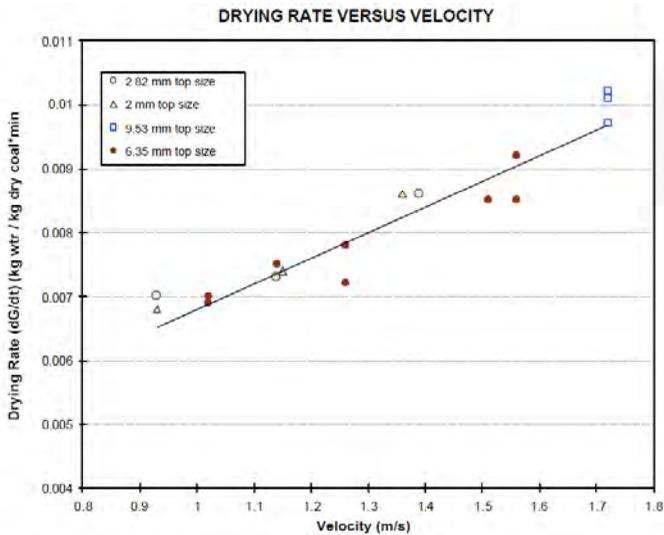
Gambar 2.7 Alat Eksperimen Penelitian [5]

Dari penelitian ini didapatkan hasil penelitian berupa pengaruh pemakaian system pengering batubara terhadap keuntungan yang didapatkan dari penghematan yang diciptakan dari proses pengeringan batubara. Kandungan air yang berada di dalam batubara dapat dikurangi dari proses pengeringan. Batubara akan memiliki nilai kalor yang lebih baik dengan berkurangnya kandungan air dalam batubara. Proses pembakaran dengan bahan bakar batubara dalam proses industri akan lebih baik ketika nilai kalor batubara naik. Pembakaran yang lebih efektif akan meningkatkan efisiensi anggaran suatu industri.



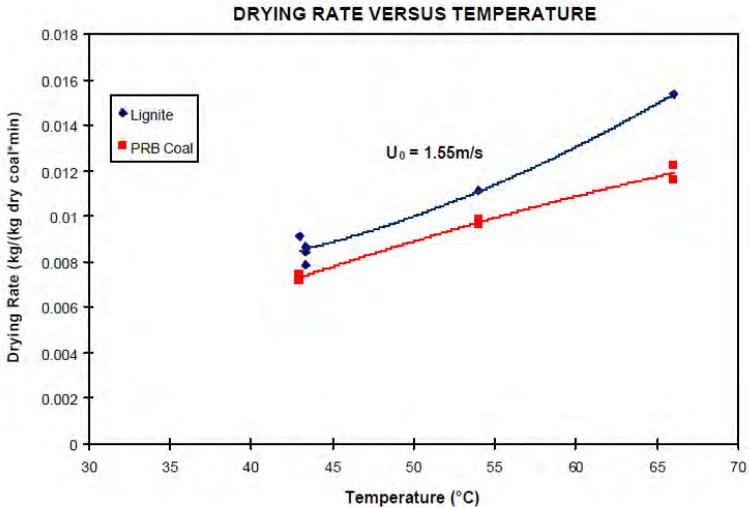
Grafik 2.8 Pengaruh Pengeringan Batubara Terhadap Penghematan [5]

Dalam penelitiannya Levy dkk (2006) [5] juga melakukan penelitian terhadap beberapa faktor yang diduga berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Ukuran partikel batubara, kecepatan udara pemanas, suhu *tube heater* dan kandungan air dalam udara pemanas merupakan beberapa variable yang coba diteliti pengaruhnya terhadap laju pengeringan batubara.



Grafik 2.9 Pengaruh Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara [5]

Berdasarkan data eksperimen pada penelitian yang dilakukan Levy dkk (2006) [5], didapatkan bahwa kecepatan udara pemanas pada sisi masuk ruangan pengering dapat berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Pada penelitian ini kecepatan udara pemanas pada sisi inlet akan meningkatkan laju pengeringan batubara apabila kecepatan ditingkatkan hingga nilai tertentu.



Grafik 2.10 Pengaruh Temperatur terhadap Pengeringan Batubara [5]

Pada penelitian yang dilakukan oleh Levy dkk (2006) [5] juga didapatkan pengaruh dari temperatur udara pemanas yang akan dilewatkan pada ruangan pengering. Dalam penelitian ini divarias batubara temperatur udara pemanas dari suhu 43°C hingga 66°C . Batubara yang digunakan dalam pengambilan data adalah batubara jenis *lignite* dan *batubara subbituminous* dari *powder river basin* (PBR) Pada penelitian ini dapat diketahui bahwa kenabatubara temperatur udara pemanas akan meningkatkan laju pengeringan batubara

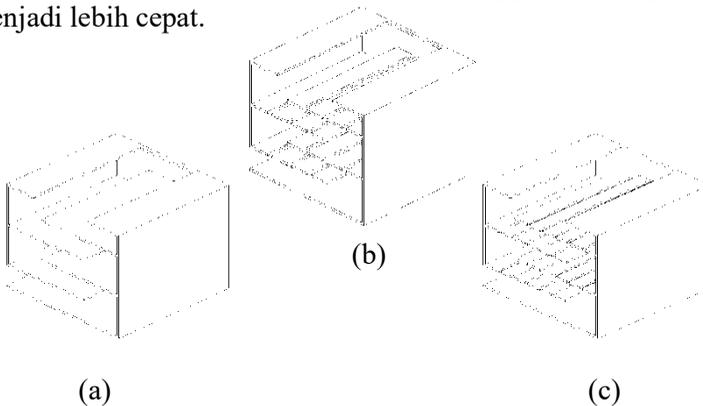
2.2.3 Sarjono Asminto Putro (2007)

Penelitian berbasis analisa numerik di dalam suatu peralatan pengeringan pernah dilakukan oleh Sarjono Asminto Putro (2007) [7]. Dalam tugas akhirnya yang berjudul “*Simulasi Numerik Dan Analisa Performansi Di Ruang Pengering Dengan Variasi Kecepatan Udara Dan Porositas*” telah dilakukan kajian pada alat pengering ikan dengan melakukan variasi pada kecepatan udara masuk dan porositas dari benda yang akan

dikeringkan. Dalam penelitiannya **Sarjono Asminto Putro (2007) [7]** melakukan pemodelan ikan sebagai objek pengeringan.

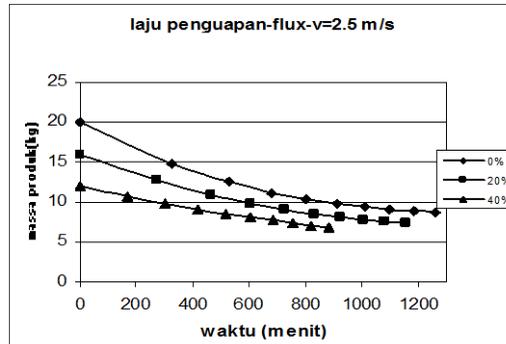
Dalam penelitian tersebut digunakan bantuan *software* Fluent 6.2 dan Gambit sebagai *software* untuk membangun geometri alat uji. Dalam simulasi digunakan permodelan aliran turbulen (Realizable K- ϵ). Sementara untuk fluida pemanasnya digunakan fluida udara dan uap air dengan temperatur Tinlet = $50^{\circ}\text{C} = 323.13^{\circ}\text{K}$. Variabel uji dalam penelitian ini adalah porositas dan kecepatan fluida pemanas pada sisi inlet. Variasi porositas yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0%, 20%, 40% sementara variasi kecepatan fluida pada sisi inlet adalah 2.5 m/s, 3.5 m/s dan 5 m/s.

Hasil yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh **Sarjono Asminto Putro (2007) [7]** adalah didapatkannya kondisi variasi porositas dan kecepatan yang diikuti dengan derajat pengeringan paling optimal. Tercatat bahwa untuk porositas 0% dan kecepatan inlet 5 m/s didapatkan parameter pengeringan meliputi laju penguapan, mass flux dan koefisien perpindahan panas tertinggi. Makin tinggi kecepatan inlet maka nilai koefisien konveksi akan mengalami kenaikan pula. Hal ini diikuti dengan naiknya koefisien perpindahan massa sehingga laju pengeringan menjadi lebih cepat.

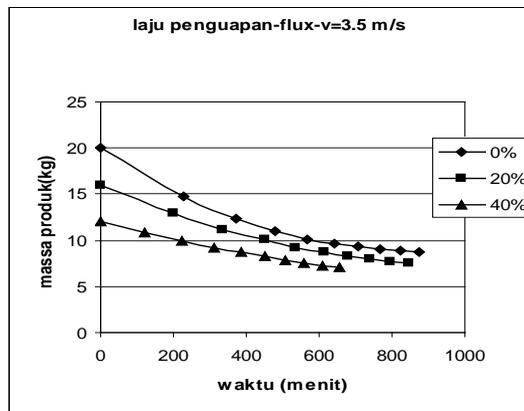


Gambar 2.11 Model Porositas dalam Tiga Dimensi[7]

(a) porositas 0%, (b) porositas 20%, (c) porositas 40%

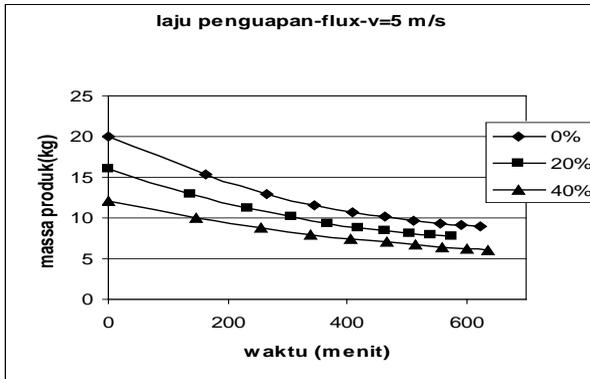


Gambar 2.12 Grafik laju penguapan kecepatan inlet 2.5 m/s [7]
 Pada Gambar 2.12 menunjukkan perbandingan laju penguapan pada setiap susunan porositas. Secara umum trend grafik tersebut menurun seiring bertambahnya waktu. Hal ini terjadi dikarenakan semakin lama terjadi penguapan pada ikan maka kandungan air dalam ikan akan mengalami penyusutan. Derajat pengeringan pada porositas 0% dapat dikatakan paling cepat.



Gambar 2.13 Grafik laju penguapan kecepatan inlet 3.5 m/s [7]
 Untuk kecepatan inlet 3.5 m/s perbandingan laju penguapan pada masing-masing variasi porositas menunjukkan trend yang hampir sama dengan grafik sebelumnya. Dengan kecepatan yang lebih tinggi maka akan didapatkan nilai *nusselt number* yang juga

tinggi sehingga nilai perpindahan massa yang dapat dilihat dari laju penguapan makin baik. Porositas yang paling baik dalam proses laju penguapan adalah porositas 0%. Hal ini terjadi karena pada porositas 0% terjadi olakan yang lebih daripada porositas 20% dan porositas 40% sehingga proses perpindahan panas dan massa pada porositas 0% lebih baik.

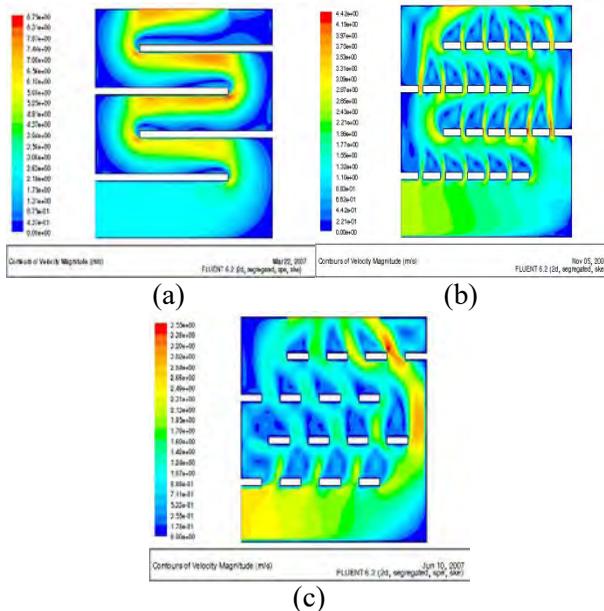


Gambar 2.14 Grafik laju penguapan kecepatan inlet 5 m/s[7]

Grafik laju penguapan pada kecepatan inlet 5 m/s juga menunjukkan trend yang hampir sama dengan grafik laju penguapan dengan kecepatan 2.5 m/s dan 3.5 m/s. Pada porositas 0% terjadi laju penguapan yang paling besar dibandingkan porositas 20% dan porositas 40%. Pada kecepatan inlet 5 m/s nilai *nusselt number* mencapai harga tertinggi karena *nusselt number* berbanding lurus dengan nilai kecepatan fluida. Laju penguapan paling tinggi terjadi pada porositas 0% dengan kecepatan fluida 5m/s.

Pada porositas 0% aliran fluida pemanas cenderung lebih turbulen jika dibandingkan dengan porositas 20% dan 40%. Peristiwa perpindahan panas dipengaruhi oleh beberapa faktor. Proses perpindahan panas di dalam ruangan pengering dipengaruhi oleh intensitas turbulensi yang ada di dalamnya. Aliran yang lebih turbulen akan meningkatkan karakteristik perpindahan panas. Proses perpindahan panas yang baik akan menyebabkan perpindahan massa antara ikan terhadap udara

pemanas akan berjalan lebih baik. Hal ini dapat dilihat dari derajat pengeringa (*drain rate*) pada porositas 0% yang lebih baik.



Gambar 2.15 Kontur Kecepatan dengan variasi porositas
(a) Porositas 0% (b) Porositas 40% (c) Porositas 20% [7]

Visualisasi kontur kecepatan pada variasi porositas menunjukkan fenomena aliran secara nyata di dalam ruang pengering. Berdasarkan kenampakan kontur pada porositas 0% kecepatan tertinggi berada di bagian tengah ruang pengering sehingga proses perpindahan panas dan massa akan lebih baik. Sementara untuk porositas 20% kecepatan terbesar terjadi di daerah sebelah kanan ruangan pengering dan untuk porositas 40% kecepatan terbesar terjadi di sebelah kiri ruangan pengering sehingga perpindahan panas dan massa pada variasi porositas 20% dan 40% menjadi kurang efektif.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODE PENELITIAN

Untuk mendefinisikan proses perpindahan panas dan massa yang terjadi di dalam ruang pengering digunakan suatu studi numerik yang dilakukan dengan metode numerik (Computational Fluid Dynamic) dengan software Fluent 6.3.26. Pada metode numerik tersebut terdapat tiga tahapan utama yang harus dilakukan pada software Fluent 6.3.26, yaitu : *preprocessing*, *solving* atau *processing*, dan *postprocessing*.

3.1 Model Pengeringan Batubara

Dalam proses awal dalam mensimulasikan proses pengeringan batubara dibutuhkan pemodelan atau perancangan awal dari instalasi alat pengering batubara tersebut. Pengeringan batubara dilakukan pada suatu *chamber* pada alat pengering batubara. Kemudian aliran udara pengering yang telah dipanaskan dari proses sebelumnya masuk melalui inlet yang kemudian akan melewati batubara yang ada dalam ruang pengering tersebut. Kecepatan pada udara pengering diatur pada kecepatan tertentu sehingga didapatkan kecepatan minimum fluidisasi dalam proses pengeringan batubara yang dapat membuat batubara tersebut terangkat ke atas. Proses pengeringan juga dibantu dengan *tube heater* yang disusun secara *staggered* pada *chamber* pengering. *Tube Heater* ini dapat memberi panas tambahan pada batubara dengan harapan dapat meningkatkan laju pengeringan batubara di dalam ruang pengering.

Nantinya pada ruang pengering batubara akan terjadi fenomena aliran dan karakteristik perpindahan panas serta massa. Sehingga penelitian hanya meninjau pada ruang pengering saja dan untuk peralatan lain tidak dilakukan analisa yang lebih mendalam. Dalam ruang pengering batubara disimulasikan tersusun secara acak dan tersebar merata di seluruh bagian ruang pengering.

3.2 *Preprocessing*

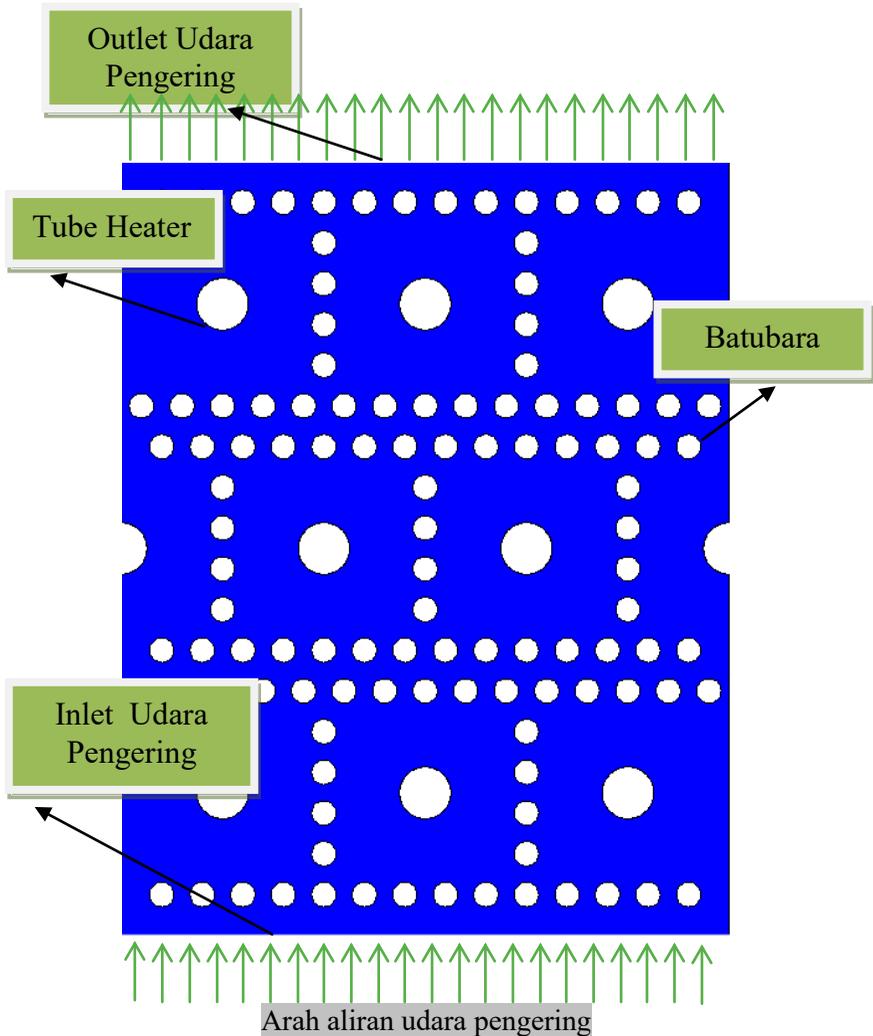
Preprocessing dilakukan sebagai metode awal dalam penelitian untuk membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (*CFD*). Tahapan *Preprocessing* terdiri dari beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

3.2.1 Domain Pemodelan *Coal Drying Chamber*

Geometri yang dibentuk dalam penelitian ini adalah geometri *coal drying chamber* disertai *tube heater* dengan susunan *staggered*. Pemodelan geometri dilakukan dengan menggunakan *software Gambit 2.4.6*. Batubara sebagai objek proses pengeringan dimodelkan tersusun secara merata di sekitar *tube heater* yang berada di dalam *coal drying chamber*.

Tabel 3.1 Geometri Drying Chamber

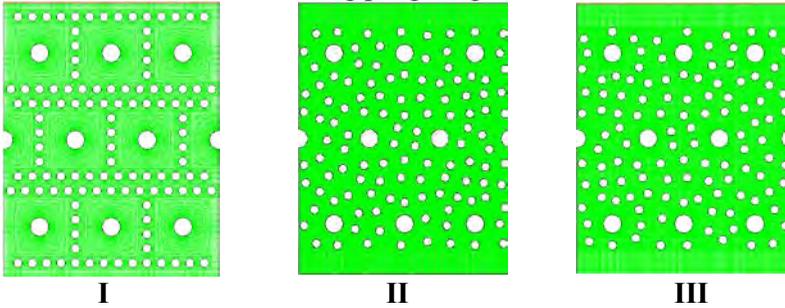
Drying Chamber	
Parameter	Dimensi (inchi)
Diameter Bed	6
Diameter tube	0.5
Pitch Tube	2
Tinggi	7
Diameter Batubara	0.236
Jumlah Batubara	114



Gambar 3.1 Geometri 2D Pemodelan Fluidized Bed Coal Dryer

Pada software fluent terdapat 3 susunan batubara yang berbeda yang akan disimulasikan untuk mengetahui ada atau tidaknya pengaruh posisi peletakan batubara terhadap laju

pengeringan batubara, berikut adalah pemodelan ketiga variasi susunan batubara dalam ruang pengering :



Gambar 3.2 Geometri 2D Variasi Susunan Batubara pada Drying Chamber

Susunan I merupakan susunan batubara yang teratur, susunan II dan susunan III merupakan susunan batubara acak.

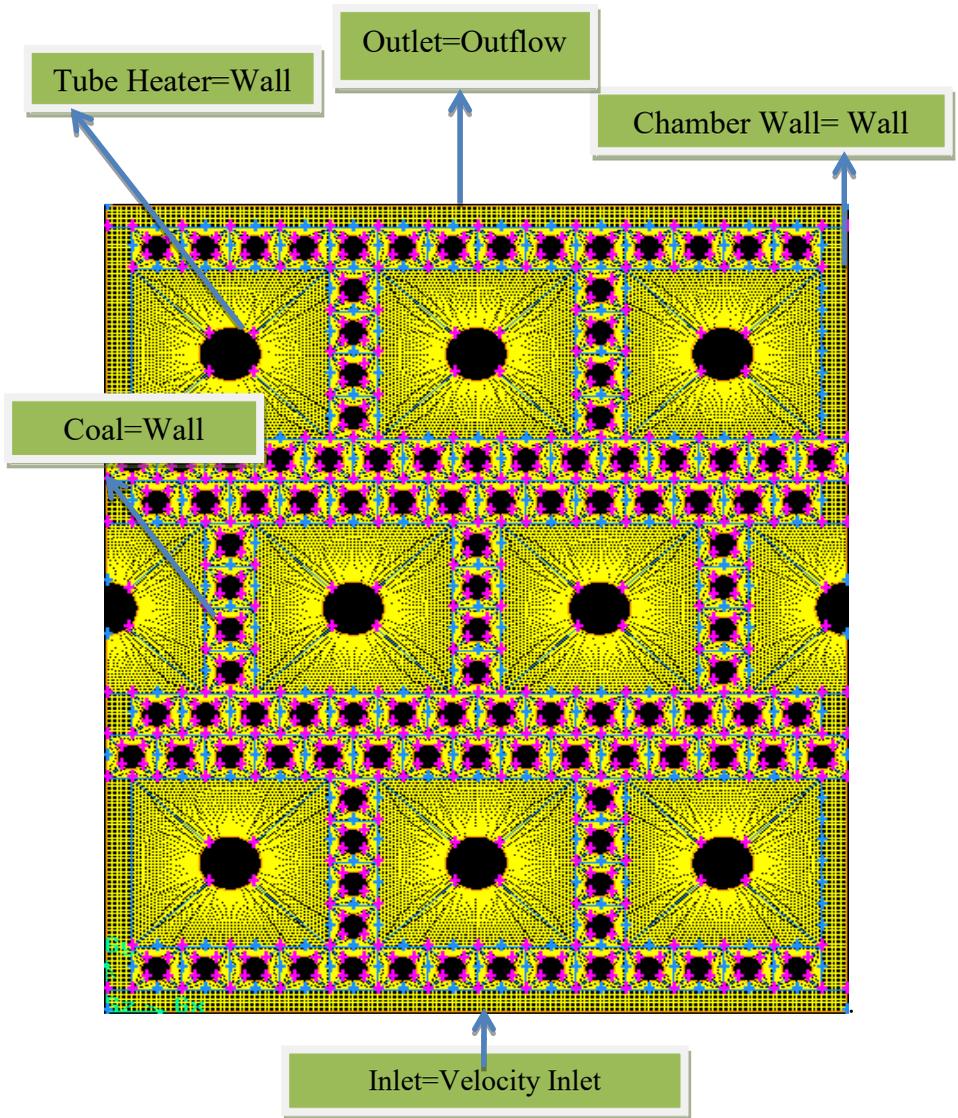
3.2.2 Variabel Penelitian Umum

Dalam suatu penelitian diperlukan variabel-variabel yang terkait di dalamnya. Hal ini dimaksudkan agar penelitian mempunyai arah dan tujuan yang jelas mengenai hubungan yang akan dicari dalam suatu penelitian. Variabel-variabel yang akan ditentukan antara lain :

- Variabel bebas : Temperatur Air Heater, kapasitas batubara
- Variabel terkontrol : Domain drying chamber, Pitch tube, Ukuran Batubara

3.2.3 Meshing

Bidang atau volum yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*meshing*) sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang dipilih adalah *quadrilateral map*. Berikut adalah pemodelan 2D *drying chamber* batubara.



Gambar 3.3 Meshing dan boundary condition pada Drying Chamber (2D-flow)

Proses meshing dilakukan dengan merapatkan *meshing* pada daerah yang dekat dengan permukaan batubara dan permukaan *tube heater*. Perapatan *meshing* pada bagian geometri tertentu dilakukan untuk meningkatkan ketelitian hasil simulasi. Fenomena dan karakteristik aliran yang dianalisa secara mendalam adalah daerah sekitar permukaan batubara dan permukaan *tube heater*. Setelah proses meshing, dilakukan perubahan format model dengan melakukan proses ekspor *file* ke bentuk format *.msh pada *software FLUENT 6.3.26*.

3.3 Processing

Pada tahapan Processing penelitian dilakukan dengan menggunakan *software FLUENT 6.3.26* yang terdiri dari tahapan dibawah ini.

- Memilih Solver

Pada saat membuka FLUENT terdapat pilihan untuk menggunakan *solver 2D/3D* dengan keakuratan tunggal atau ganda (*single precision/double precision*). Secara umum, *solver single precision* cukup akurat untuk berbagai kasus sehingga dalam penelitian ini digunakan *solver single precision*.

- Memilih Formulasi Solver

Fluent menyediakan tiga formulasi *solver*, yaitu:

-  *Segregated*
-  *Coupled Implisit*
-  *Coupled Eksplisit*

Formulasi *solver segregated* dan *coupled* mempunyai perbedaan pada cara penyelesaian persamaan kontinuitas, momentum, dan energi. *Solver segregated* menyelesaikan persamaan tersebut secara bertahap (terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain), sementara *solver coupled* menyelesaikan semua persamaan tersebut secara bersamaan¹. *Solver coupled implisit* dan *eksplisit* sendiri mempunyai perbedaan pada cara melinierkan persamaan yang

¹ *Dasar-dasar CFD menggunakan FLUENT (Firman Tuakia., 2008)*

akan diselesaikan. Pada penelitian ini digunakan solver segregated untuk menyelesaikan persamaan yang ada.

- **Pemilihan Spesies**

Pada penelitian ini juga digunakan pemodelan spesies transport. Pemodelan Spesies transport digunakan untuk memodelkan kondisi perpindahan massa yang terjadi pada permukaan batubara yang mengandung fraksi massa air (H_2O).

- **Pemilihan Turbulence Modelling**

Referensi penentuan Turbulence Modelling pada penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh **Sarjono (2007)**[7]. Pada penelitian terdahulu digunakan Turbulence modelling *realizable k-epsilon model*. Sehingga model turbulence ini digunakan sebagai acuan peneliti dalam pengambilan data.

- **Pemilihan Operating Condition**

Setelah melakukan pemilihan turbulence modeling, pengaturan operating condition menjadi penting untuk dilakukan pada proses selanjutnya. Kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah tekanan operasi pada saat fluidized bed dryer digunakan untuk mengeringkan batubara. Pada penelitian ini tekanan operasi yang digunakan adalah 101325 Pa.

- **Boundary Condition**

Dalam mendefinisikan suatu kasus, harus memasukkan informasi pada variabel aliran pada domain kasus tersebut. Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas yang digunakan. Dalam simulasi ini menggunakan batas kondisi sebagai berikut :

Tabel 3.2 *Boundary Condition Drying Chamber*

Boundary Condition	Keterangan
Inlet	Tipe : Velocity Inlet Temperatur : 316 K, 327 K, 339 K Fraksi massa : 0.01659 Kecepatan : 16,187 m/s (arah

	sumbu-y)
Outlet	Tipe : Outflow
Wall	Tipe : Wall
Wall Tube	Tipe : Wall Temperatur : 348 K
Coal	Tipe : Wall Temperatur : 301 K Fraksi massa : 0.22

Dalam simulasi ini akan divariasikan temperatur inlet sebesar 316 K, 327 K, dan 339 K. Dengan variasi tersebut, diharapkan dapat memperlihatkan grafik drying rate yang menunjukkan karakteristik sebuah proses pengeringan. Pada kondisi sebelum masuk *air heater*, udara yang disuplai menuju *drying chamber* dalam kondisi udara di wilayah Surabaya dengan temperature 27°C serta kelembaban relatif 73% dan moisture content 0.01659 $\frac{\text{Kg water}}{\text{Kg air}}$ (BMKG Republik Indonesia).

Data-data diatas didapatkan dengan proses perhitungan demikian :

- Menentukan fraksi massa H₂O pada inlet.

Dari persamaan fraksi massa (2.12) adalah

$$Y_{H_2O} = \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg } H_2O + \text{kg dry air}}$$

Sedangkan dari persamaan rasio kelembaban (2.11)

adalah

$$W_{H_2O} = \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg dry air}}$$

$$\text{kg } H_2O = \text{kg dry air} \cdot W_{H_2O} \quad (3.1)$$

Persamaan (3.1) disubstitusikan pada persamaan (2.12),

menjadi

$$Y_{H_2O} = \frac{\text{kg dry air} \cdot W_{H_2O}}{\text{kg dry air} \cdot W_{H_2O} + \text{kg dry air}} \quad (3.2)$$

$$Y_{H_2O} = \frac{\text{kg dry air} \cdot 0.01687}{\text{kg dry air} \cdot 0.01687 + \text{kg dry air}}$$

$$Y_{H_2O} = \frac{0.01687}{0.01687 + 1}$$

$$Y_{H_2O} = \frac{0.01687}{0.01687 + 1}$$

$$Y_{H_2O} = 0,01659 \text{ Kg water / Kg air}$$

- Menentukan fraksi massa H₂O pada dinding batubara
Dari tabel Karakteristik Batubara (Low Rank Coal) berdasarkan Wilayahnya, didapatkan data batubara untuk wilayah Indonesia memiliki *moisture content* sebesar 22%.

$$MC = \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg } H_2O + \text{kg dry air}} \quad (3.3)$$

Sedangkan perumusan fraksi massa adalah sebagai berikut :

$$Y_{H_2O} = \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg } H_2O + \text{kg dry air}}$$

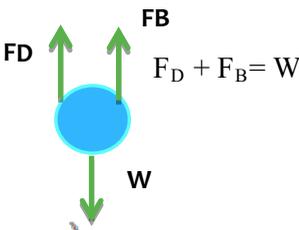
(2.12)

sehingga kandungan fraksi massa sama dengan nilai *moisture content*, yaitu 0,22 atau 22%.

Dalam penelitian mengenai karakteristik pengeringan pada *drying chamber* kecepatan minimum fluidisasi atau *minimum fluidization velocity* adalah faktor kecepatan yang penting untuk diketahui yang merupakan kecepatan udara pengering agar batubara dapat melayang di dalam *drying chamber*. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya kecepatan minimum fluidisasi seperti dinyatakan dalam persamaan Ergun adalah diameter partikel, viskositas udara, percepatan gravitasi dan berat jenis partikel, dan biasanya persamaan yang banyak dipakai dalam penelitian fluidized bed ini tidak memperhitungkan

gaya antar partikel, dan dimana rongga udara pada saat terjadi fluidisasi dapat diabaikan.

Kecepatan minimum fluidisasi atau dapat juga disebut *terminal velocity* didapatkan bila gaya berat dari batubara dilawan oleh gaya hambat /drag force dan gaya buoyancy (gaya tekan ke atas) dari udara panas yang masuk ke dalam chamber, sehingga didapatkan perumusan sebagai berikut :



$$F_D + F_B = W$$

$$\left(\frac{1}{2} \times C_d \times \rho_{\text{udara}} \times V^2 \times A \right) + (\rho_{\text{udara}} \times \text{Volume} \times g)$$

$$= \rho_{\text{batubara}} \times \text{Volume} \times g$$

Dimana : $C_d = \text{Koefisien drag} / 0.47$

$g = \text{Percepatan gravitasi} / 9.8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$

$\rho_{\text{udara}} = 1.062 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{\text{batubara}} = 1350 \text{ kg/m}^3$

$$\frac{1}{2} \times 0.47 \times 1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times V^2 \times \frac{1}{4} \pi (5.9944 \times 10^{-2} \text{m})^2 + (1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times \frac{4}{3} \pi (2.99772 \times 10^{-2} \text{m})^3)$$

$$= 1350 \text{ kg/m}^3 \times \frac{4}{3} \pi (2.99772 \times 10^{-2} \text{m})^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$V^2 = 211.7$$

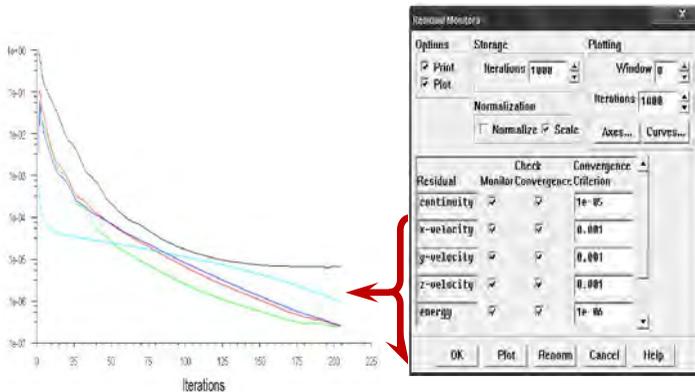
$$V = 14.55 \text{ m/s}$$

- **Intialize**

Initialize merupakan tebakan awal agar lebih memudahkan proses iterasi untuk mencapai kondisi konvergen.

- **Iterasi**

Yaitu proses perhitungan yang berulang-ulang dari kondisi batas yang diberikan sampai konvergensi tercapai. Untuk menyimpulkan hasil iterasi telah konvergen atau belum tidak hanya cukup dengan mengamati level residual, tapi juga harus mengamati kesetimbangan/ balans massa dan energi. Terdapat metode yang umum dipakai untuk mengecek konvergensi hasil iterasi, yaitu Residual Konvergensi. Residual Konvergen adalah berhentinya iterasi karena sudah mencapai kriteria konvergensi yang kita tentukan.



Gambar 3.4 Trend Grafik Hasil Iterasi

Proses iterasi dilakukan dengan mengatur nilai residual konvergensi terlebih dahulu. Residual konvergensi adalah tingkat konvergensi suatu iterasi dalam sebuah analisa numerik. Pada umumnya makin kecil nilai konvergensi residual yang digunakan dalam sebuah iterasi makin lama pula iterasi yang dilakukan. Hal ini berlaku sebaliknya, akan tetapi dengan meningkatkan nilai konvergensi residual akan meningkatkan kualitas pengolahan data yang lebih baik.

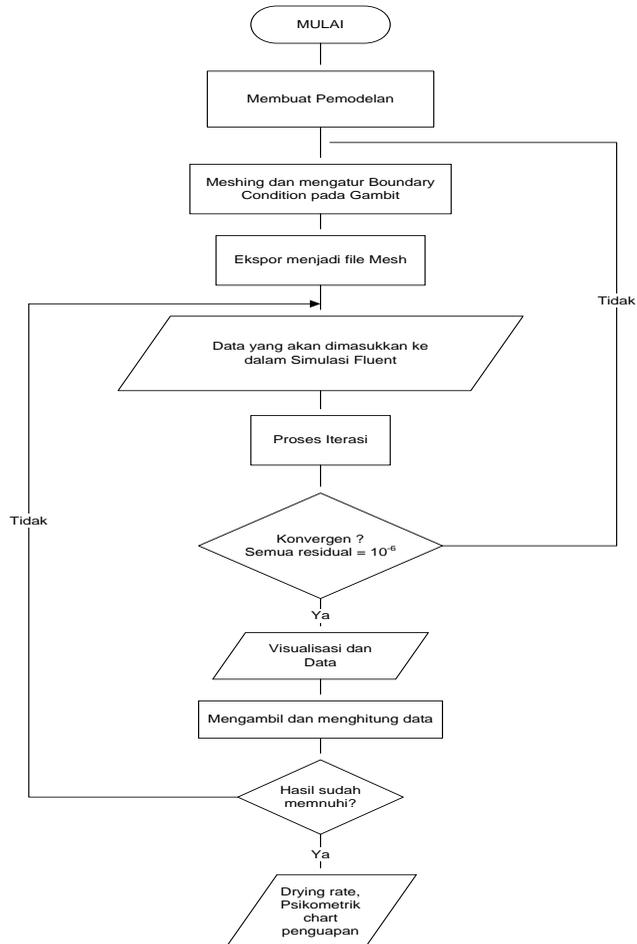
3.4 Postprocessing

Setelah solusi numerik didapatkan dapat dilihat data kualitatif berupa kontur temperatur dan kontur fraksi massa dalam *drying chamber fluidized bed coal dryer* dengan *tube heater* yang tersusun secara *staggered*. Data kualitatif yang diperoleh akan dianalisa untuk melihat karakteristik pengeringannya.

Data kuantitatif didapatkan dengan melakukan ekstraksi data pada hasil simulasi. Pada penelitian ini data-data yang diperoleh berupa fraksi massa H₂O rata-rata (\bar{Y}), temperatur (T), koefisien perpindahan panas rerata (\bar{h}), koefisien difusi massa (D_{AB}), konduktifitas panas fluida (k), massa jenis (ρ) dan panas spesifik (c_p). Data-data ini diolah dengan software Microsoft Excel 2010 untuk mendapatkan laju pengeringan produk dan perubahan *moisture content* produk terhadap waktu.

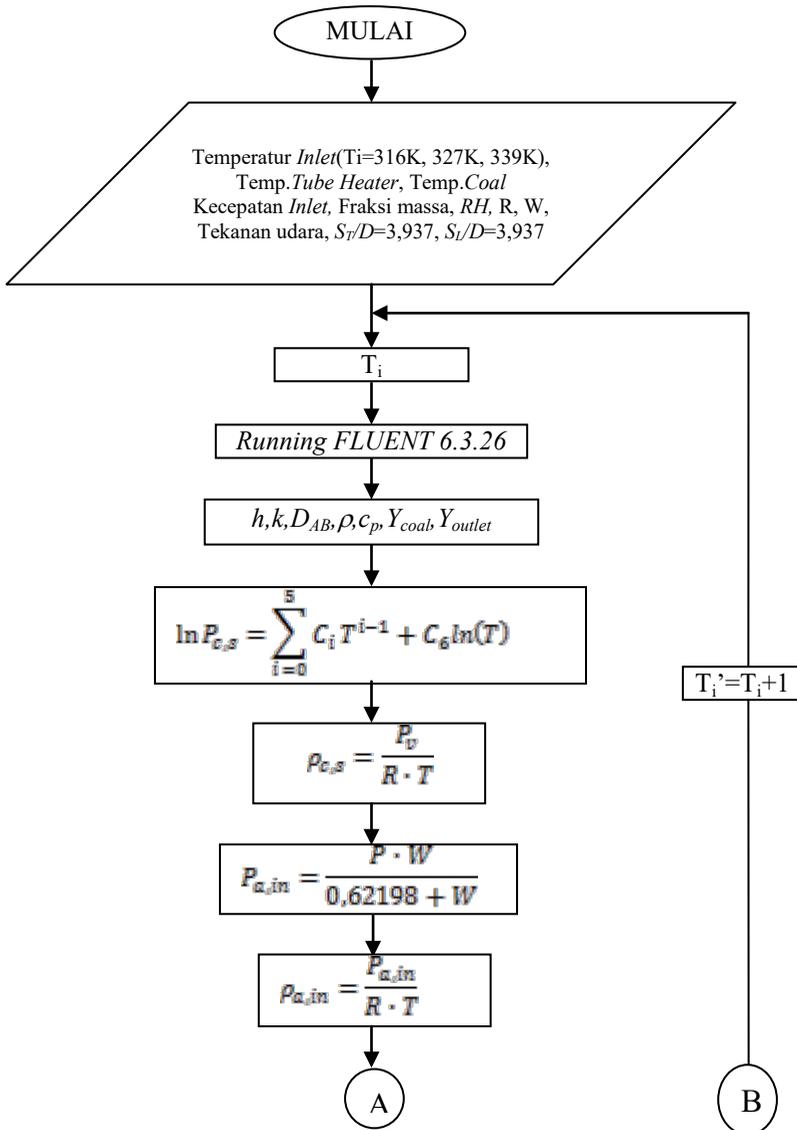
3.5 Flowchart Metode Penelitian

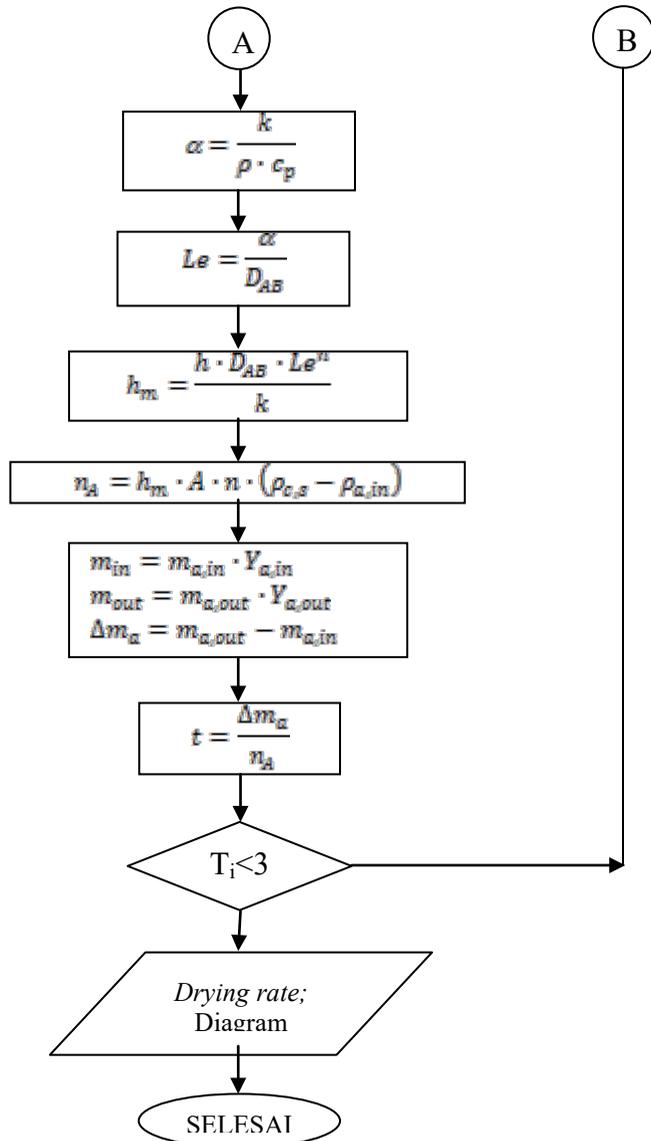
Berikut ini adalah metode penelitian yang dipakai dalam penelitian karakteristik pengeringan batubara pada *fluidized bed coal dryer* dengan *tube heater* yang tersusun *staggered*.



Gambar 3.5 Flowchart metodologi penelitian

3.6 Flowchart Perhitungan





Gambar 3.6 Flowchart perhitungan

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

Untuk melakukan pengolahan data yang digunakan dalam proses-proses selanjutnya digunakan data-data yang didapatkan dari perhitungan secara numerik melalui *software Fluent 6.3.26* (pada lampiran I)

4.2 Contoh Perhitungan

Pada *software Fluent 6.3.26* dilakukan simulasi proses pengeringan dengan variasi temperatur air heater 316 K, 327 K, dan 339 K yang kemudian mendapatkan beberapa data output hasil perhitungan secara numerik yang akan digunakan untuk analisa selanjutnya. Analisa data output hasil simulasi dilakukan dengan menggunakan teori sesuai dengan penelitian terkait. Berikut adalah data yang digunakan dalam proses perhitungan selanjutnya :

- Temperatur inlet = 316 K (43°C)
- Velocity Inlet = 14.55 m/s
- Fraksi massa H₂O inlet = 0,01659
- Humidity ratio (w) inlet = 0,01687
- Temperatur tube heater = 348 K (75°C)
- Temperatur coal = 301 K (28°C)
- Moisture Content batubara = 0,22
- Humidity Relative H₂O pada coal = 100 %
- Tekanan pada ruang pengeringan = 101325 Pa
- Konstanta gas ideal = 461,5 J/kg.K

4.2.1 Menghitung Density H₂O pada permukaan Batubara.

- Tekanan Parsial H₂O pada permukaan batubara

$$\ln(P_{ws}) = \sum_{i=0}^5 C_i T^{i-1} + C_6 \ln(T)$$

Diketahui :

$$\begin{aligned} C_0 &= -5,8002206 \times 10^3 \\ C_1 &= 1,3914993 \\ C_2 &= -4,8640239 \times 10^{-2} \\ C_3 &= 4,1764768 \times 10^{-5} \\ C_4 &= -1,4452093 \times 10^{-8} \\ C_5 &= 0 \\ C_6 &= 6,5459673 \end{aligned}$$

dengan temperatur permukaan batubara 301 K, maka didapatkan :

$$\begin{aligned} \ln(P_{ws}) &= 8,229 \\ P_{ws} &= \exp[\ln(P_{ws})] \\ P_{ws} &= \exp[8,229] \\ P_{ws} &= 3749,27 \text{ Pa} \end{aligned}$$

- Tekanan uap air

$$\begin{aligned} P_w &= \phi \cdot P_{ws} \\ P_w &= 1 \times 3749,27 \\ P_w &= 3749,27 \text{ Pa} \end{aligned}$$

- Density pada permukaan batubara

$$\begin{aligned} \rho_{H_2O,coal} &= \frac{P_w}{R \times T} \\ \rho_{H_2O,coal} &= \frac{3749,27 \text{ Pa}}{461,5 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times 301 \text{ K}} \\ \rho_{H_2O,coal} &= 0,02699 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

4.2.2 Menghitung Density H₂O pada udara inlet.

- Tekanan udara inlet

$$P_{w,in} = \frac{P \cdot w_{inlet}}{(Ra/Rs) + w_{inlet}}$$

Dimana : Ra = tetapan gas untuk udara kering = 287 J/kg.K

Rs = tetapan gas untuk uap air = 461.5 J/kg.K

P = tekanan udara pemering

$$P_{w,in} = \frac{P \cdot w_{inlet}}{(287/461.5) + 0,01687}$$

$$P_{w,in} = \frac{P \cdot w_{inlet}}{0,62198 + 0,01687}$$

$$P_{w,in} = \frac{101325 \cdot 0,01687}{0,62198 + 0,01687}$$

$$P_{w,in} = 2675,67 \text{ Pa}$$

- Density uap air (H₂O) pada udara inlet

$$\rho_{H_2O,inlet} = \frac{P_{w,in}}{R \cdot T_{inlet}}$$

$$\rho_{H_2O,inlet} = \frac{2675,67}{461,5 \cdot 316}$$

$$\rho_{H_2O,inlet} = 0,018347374 \text{ kg/m}^3$$

4.2.3 Perhitungan setelah Running Fluent

Setelah melakukan proses iterasi *software Fluent* 6.3.26 dengan Boundary condition yang sudah ditentukan pada Bab III, didapatkan data-data sebagai berikut :

- Koefisien konveksi (h) = 390,7457 W/m².K
- Konduktivitas termal (k) = 0,0454 W/m.K

- *Density* (ρ)_{pada coal}
= 1,093524 kg/m³
- *Specific heat* (C_p)_{pada coal}
= 1063,863 J/kg.K
- *Binary Diffusion coefficient* (D_{AB})
= 2,88 x 10⁻⁵ m²/s
- Fraksi massa pada permukaan batubara (Y_{H_2O})_{coal}
= 0,05700137
- Fraksi massa outlet (Y_{H_2O})_{outlet} = 0,06611504

Dari data-data tersebut akan dilakukan perhitungan :

- Thermal Diffusivity (α)

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

$$\alpha = \frac{0,0454 \frac{W}{m \cdot K}}{1,093524 \frac{kg}{m^3} \cdot 1063,863 \frac{J}{kg \cdot K}}$$

$$\alpha = 3,90249 \times 10^{-5}$$

- Lewis Number (Le)

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}}$$

$$Le = \frac{3,90249 \times 10^{-5} m^2/s}{2,88 \times 10^{-5} m^2/s}$$

$$Le = 1,355031344$$

- Koefisien Perpindahan Massa secara Konveksi (h_m)

$$h_m = \frac{h \times D_{AB} \times Le^n}{k}$$

$$h_m = \frac{390,7457 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 2,88 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s} \times 1,355031344^{\frac{1}{3}}}{0,0454 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$h_m = 0,274292515 m/s$$

- Laju Flux Massa atau Laju Pengeringan (n_A'')

$$n_A'' = h_m \times (\rho_{H_2O, coal} - \rho_{H_2O, inlet})$$

$$n_A'' = 0,274292515 \text{ m/s} \times (0,02699 \text{ kg/m}^3 - 0,018347 \text{ kg/m}^3)$$

$$n_A'' = 0,002370705 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

- Laju Perpindahan Massa (N_A'')

$$n_A = n_A'' \times A \times 100$$

$$n_A = 0,002370705 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \times 4 \cdot \pi \cdot r^2 \times 100$$

$$n_A = 0,002370705 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \times 4,3,14 \cdot (0,003)^2 \times 100$$

$$n_A = 2,8420 \times 10^{-5} \text{ kg air/s}$$

- Massa H₂O pada Inlet

Dengan asumsi massa udara yang masuk ke *dryer chamber* adalah 1 kg, maka untuk mengetahui massa uap air yang terkandung dalam udara tersebut adalah :

$$m_{H_2O, inlet} = \text{massa udara}_{inlet} \cdot Y_{H_2O}$$

$$m_{H_2O, inlet} = 1 \text{ kg} \cdot 0,01659$$

$$m_{H_2O, inlet} = 0,01659 \frac{\text{kg air}}{\text{kg udara}}$$

- Massa H₂O pada Outlet

Massa udara yang keluar dari *drying chamber* adalah sama dengan massa udara yang masuk, karena berlaku hukum konservasi massa. Sehingga massa uap air pada outlet adalah :

$$m_{H_2O, outlet} = \text{massa udara}_{outlet} \cdot Y_{H_2O}$$

$$m_{H_2O, outlet} = 1 \text{ kg} \cdot 0,06611504$$

$$m_{H_2O, outlet} = 0,06611504 \frac{\text{kg uap air}}{\text{kg udara}}$$

- Massa H₂O yang dibawa oleh Udara Pengering

$$\Delta m_{H_2O} = m_{H_2O, outlet} - \text{massa}_{H_2O, inlet}$$

$$\Delta m_{H_2O} = (0,06611504 - 0,01659) \text{ kg uap air}$$

$$\Delta m_{H_2O} = 0,04952504 \frac{kg \text{ uap air}}{kg \text{ udara}}$$

- Massa H₂O pada Permukaan Batubara Awal
 Dengan asumsi batubara yang diumpankan ke drying chamber adalah sebesar 1 kg batubara, maka massa air yang terkandung dalam batubara adalah :

$$m_{H_2O,coal} = Y_{H_2O,coal} \cdot \text{massa batubara}$$

$$m_{H_2O,coal} = 0,22 \times 1 \text{ kg}$$

$$m_{H_2O,coal} = 0,22 \frac{kg \text{ uap air}}{kg \text{ batubara}}$$

- Massa H₂O pada Permukaan Batubara Akhir

$$m_{H_2O,coal \text{ akhir}} = m_{H_2O,coal} - \Delta m_{H_2O}$$

$$m_{H_2O,coal \text{ akhir}} = 0,22 \text{ kg air} - 0,04952504 \text{ kg air}$$

$$m_{H_2O,coal \text{ akhir}} = 0,170475 \frac{kg \text{ uap air}}{kg \text{ batubara}}$$

- Waktu Pengeringan (t)

$$t = \frac{\Delta m_{H_2O}}{n_A}$$

$$t = \frac{0,04952504 \text{ kg uap air}}{2,8420 \times 10^{-5} \text{ kg/s}}$$

$$t = 1742,565205 \text{ sekon}$$

4.2.4 Boundary Condition untuk Running Selanjutnya

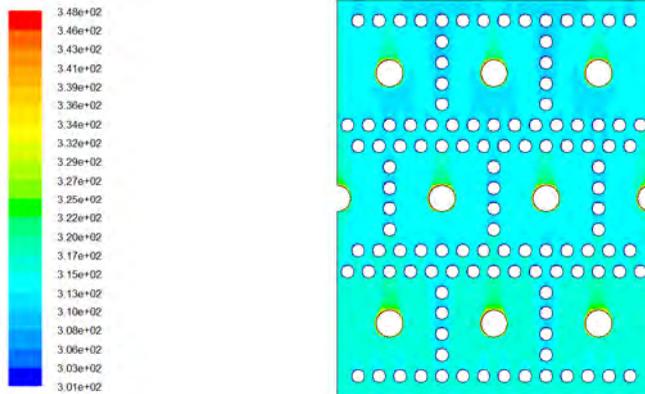
Untuk melakukan running selanjutnya, digunakan temperatur dan fraksi massa H₂O yang terukur dari proses sebelumnya pada *software Fluent 6.3.26* dan selanjutnya dilakukan iterasi untuk menghasilkan data-data seperti yang didapatkan dari hasil running sebelumnya. Data-data yang baru didapatkan tersebut diolah lagi untuk mendapatkan nilai waktu pengeringan batubara. Running dilakukan secara bertahap hingga nilai fraksi massa H₂O pada batubara terakhir hampir sama atau

tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan fraksi massa H_2O dari data sebelumnya.

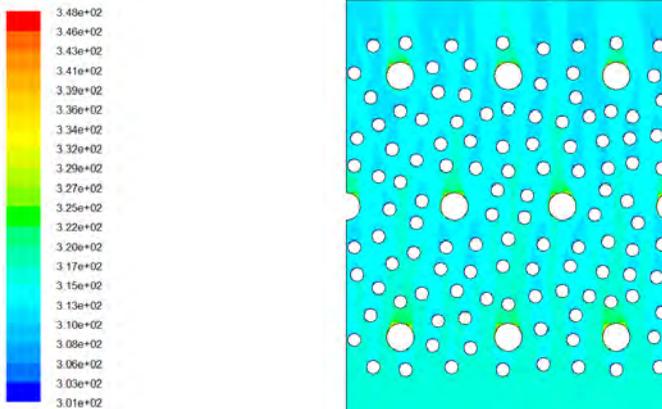
4.3 Analisa Kontur dan Drying Rate dengan Variasi Susunan Batubara

4.3.1 Analisa Kontur Temperatur

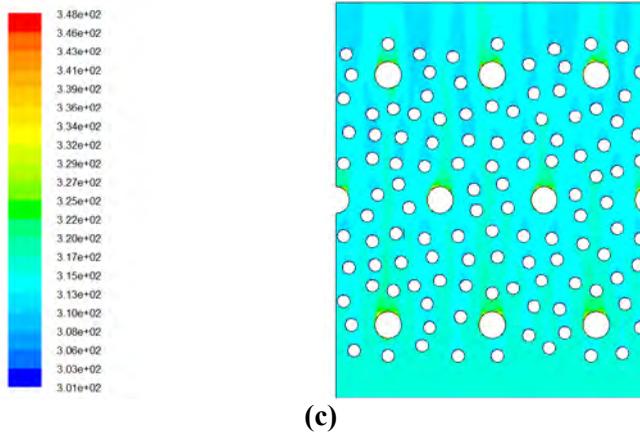
a. Temperatur Inlet 316 K



(a)



(b)



(c)
Gambar 4.1 Kontur Temperatur pada variasi Temperatur Inlet 316 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2.

Kontur temperatur pada temperatur inlet 316 K pada susunan batubara teratur, susunan batubara acak 1, maupun susunan batubara acak 2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Kontur di daerah sekitar tube memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara pengering sekitar. Pada sisi outlet pada ketiga kontur temperatur tersebut menunjukkan temperatur udara pengering yang lebih rendah dibandingkan daerah sisi inlet dan sisi tengah ruang pengering. Hal ini disebabkan udara pengering yang masuk pada sisi inlet mengalami penurunan temperatur setelah melewati susunan batubara yang memiliki temperatur yang lebih rendah.

Pada kontur temperatur dari inlet 316 K memiliki persebaran temperatur yang paling rendah dibandingkan kontur temperatur dari temperatur inlet lainnya. Hal tersebut terjadi pada seluruh kontur temperatur pada temperatur inlet 316 K di semua variasi susunan batubara. Sehingga susunan peletakan batubara tidak mempengaruhi kontur temperatur udara pengering di dalam ruang pengering.

Terlihat dari gambar 4.1 di sekitar *tube heater* udara pengering tampak memiliki temperatur yang lebih tinggi dari pada udara pengering sekitarnya. Kontur pada bagian batubara terjadi perbedaan temperatur yang sangat kecil sekali. Pada iterasi awal terdapat temperatur udara yang relatif lebih rendah daripada temperatur iterasi akhir. Hal ini disebabkan karena terjadi perpindahan panas antara batubara dengan udara pengering.

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \dots \dots \dots (4.1)$$

$$q = h \cdot A \cdot (T_{\infty, \text{inlet}} - T_{\text{coal}}) \dots \dots \dots (4.2)$$

Tentunya nilai q bertambah besar karena nilai ΔT semakin besar. Pada proses iterasi terakhir memiliki nilai ΔT yang paling rendah, sehingga terjadi perpindahan panas kecil. Maka nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi (h), semakin besar.

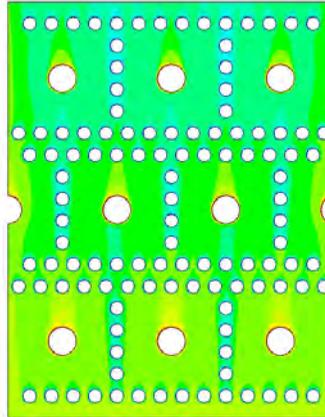
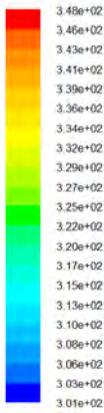
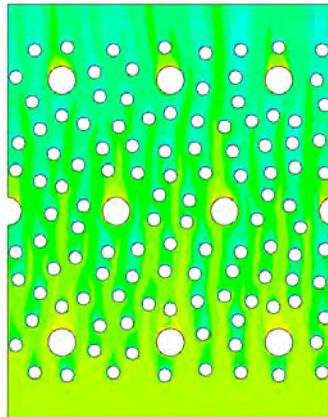
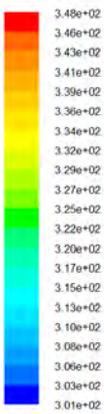
$$h_m = \frac{h \times Le^n \times Da}{k} \dots \dots \dots (4.3)$$

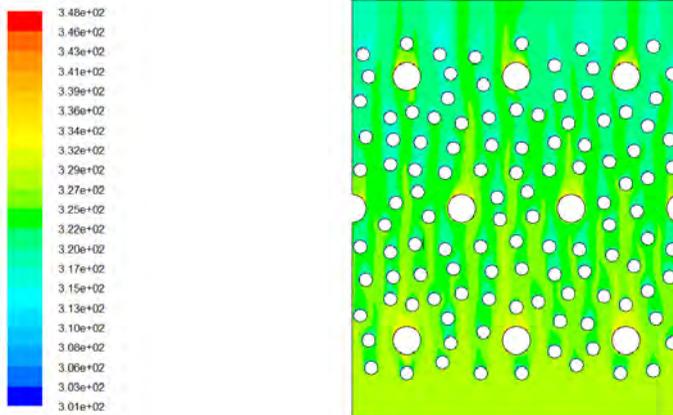
dimana : h : Koefisien Perpindahan Panas

Le : Lewis Number

Da : Koefisien binary diffusion

Sehingga dengan turunnya nilai koefisien perpindahan panas akan mengakibatkan turunnya nilai koefisien perpindahan massa, karena koefisien perpindahan panas berbanding terbalik dengan koefisien perpindahan massa seperti terlihat pada rumus di atas. Sehingga turunnya laju pengeringan batubara akan diikuti dengan turunnya perbedaan suhu antara temperatur udara pengering dengan temperatur batubara.

b. Temperatur Inlet 327 K**(a)****(b)**



(c)

Gambar 4.2 Kontur Temperatur pada variasi Temperatur Inlet 327 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2.

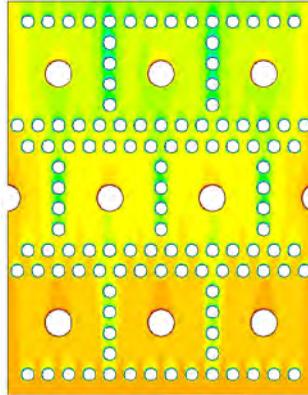
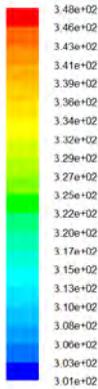
Kontur temperatur pada temperatur inlet 327 K pada susunan batubara teratur, susunan batubara acak 1, maupun susunan batubara acak 2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Kontur di daerah sekitar tube memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara pengering sekitar. Pada sisi outlet pada ketiga kontur temperatur tersebut menunjukkan temperatur udara pengering yang lebih rendah dibandingkan daerah sisi inlet dan sisi tengah ruang pengering. Hal ini disebabkan udara pengering yang masuk pada sisi inlet mengalami penurunan temperatur setelah melewati susunan batubara yang memiliki temperatur yang lebih rendah.

Hal tersebut terjadi pada seluruh kontur temperatur pada temperatur inlet 327 K di semua variasi susunan batubara. Sehingga susunan peletakan batubara tidak mempengaruhi kontur temperatur udara pengering di dalam ruang pengering.

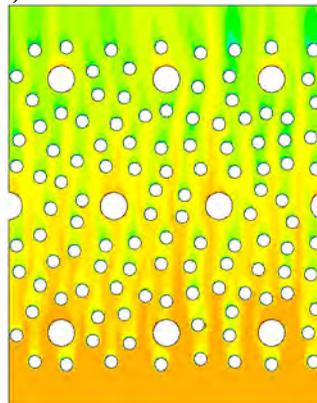
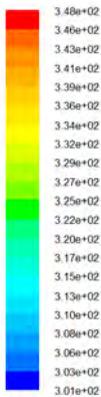
Terlihat dari gambar 4.2 di sekitar *tube heater* udara pengering tampak memiliki temperatur yang lebih tinggi dari

pada udara pengering sekitarnya. Kontur pada bagian batubara terjadi perbedaan temperatur yang sangat kecil sekali.

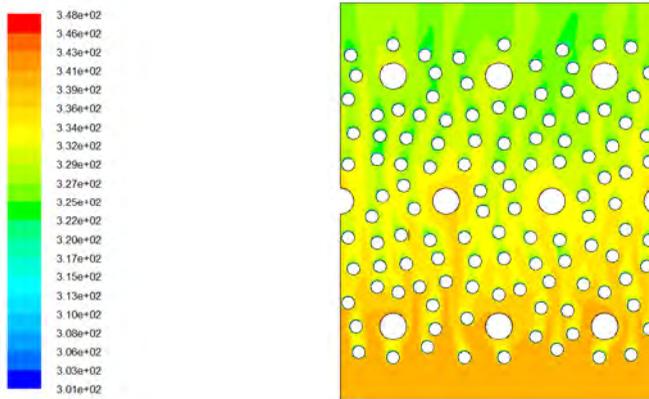
c. Temperatur Inlet 339 K



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.3 Kontur Temperatur pada variasi Temperatur Inlet 339 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (c) Susunan Batubara Acak 2.

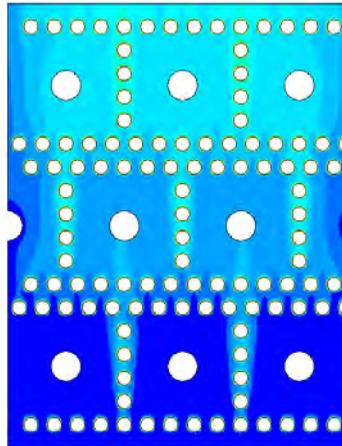
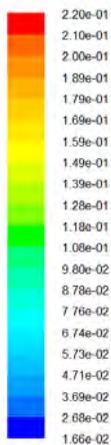
Kontur temperatur pada temperatur inlet 339 K pada susunan batubara teratur, susunan batubara acak 1, maupun susunan batubara acak 2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Kontur di daerah sekitar tube memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara pengering sekitar. Pada sisi outlet pada ketiga kontur temperatur tersebut menunjukkan temperatur udara pengering yang lebih rendah dibandingkan daerah sisi inlet dan sisi tengah ruang pengering. Hal ini disebabkan udara pengering yang masuk pada sisi inlet mengalami penurunan temperatur setelah melewati susunan batubara yang memiliki temperatur yang lebih rendah.

Pada kontur temperatur dari inlet 339 K memiliki persebaran temperatur yang paling tinggi dibandingkan kontur temperatur dari temperatur inlet lainnya. Hal tersebut terjadi pada seluruh kontur temperatur pada temperatur inlet 339 K di semua variasi susunan batubara. Sehingga susunan peletakan batubara tidak mempengaruhi kontur temperatur udara pengering di dalam ruang pengering.

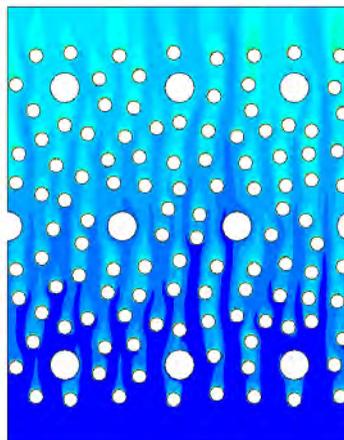
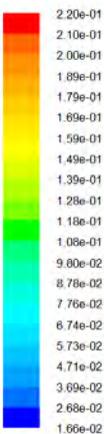
Terlihat dari gambar 4.3 di sekitar *tube heater* udara pengering tampak memiliki temperatur yang lebih tinggi dari pada udara pengering sekitarnya. Kontur pada bagian batubara terjadi perbedaan temperatur yang sangat kecil sekali.

4.3.2 Analisa Kontur Fraksi Massa H_2O

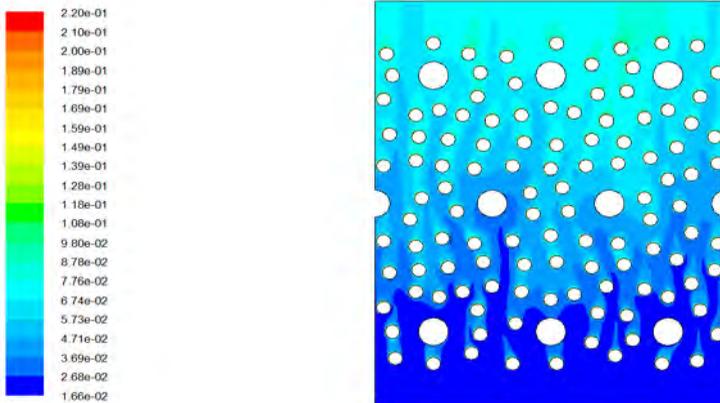
a. Temperatur Inlet 316 K



(a)



(b)



(c)

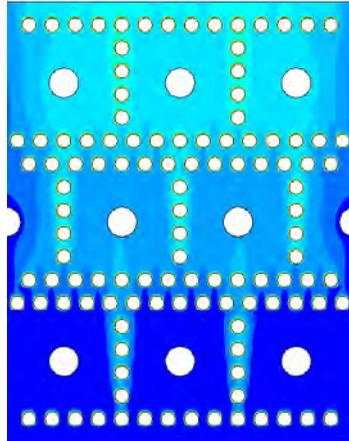
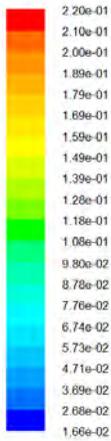
Gambar 4.4 Kontur Fraksi Massa H_2O pada variasi Temperatur Inlet 316 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (c) Susunan Batubara Acak 2.

Kontur fraksi massa H_2O pada temperatur inlet 316 K pada susunan batubara teratur, susunan batubara acak 1, maupun susunan batubara acak 2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Pada sisi outlet pada ketiga kontur fraksi massa H_2O tersebut menunjukkan kandungan air pada udara pengering yang lebih tinggi dibandingkan daerah sisi inlet. Hal ini disebabkan karena kandungan air di dalam batubara telah terbawa oleh udara pengering menuju ke sisi outlet sehingga semakin ke bagian atas chamber kandungan airnya akan semakin banyak.

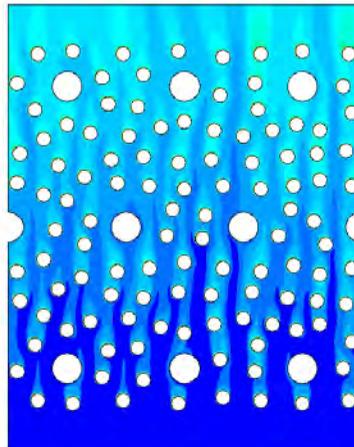
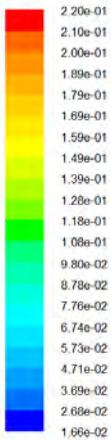
Pada proses pengeringan ini juga terjadi proses penurunan *moisture content* pada batubara, dimana udara pengering membawa kadar air pada batubara. Kadar air dalam udara akan naik sesaat setelah melewati dinding batubara. Perubahan *moisture content* adalah penurunan kadar air pada permukaan batubara dikarenakan aliran udara yang membawa kadar air tersebut. Hal tersebut terjadi pada seluruh kontur fraksi massa H_2O pada temperatur inlet 316 K di semua variasi susunan batubara. Sehingga susunan peletakan batubara tidak

mempengaruhi kontur fraksi massa H_2O udara pengering di dalam ruang pengering.

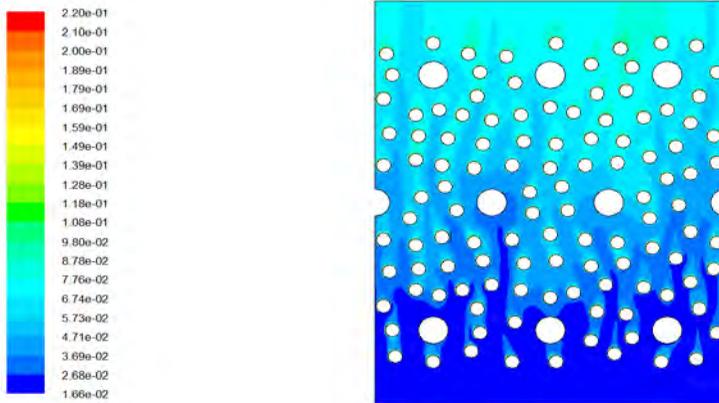
b. Temperatur Inlet 327 K



(a)



(b)



(c)

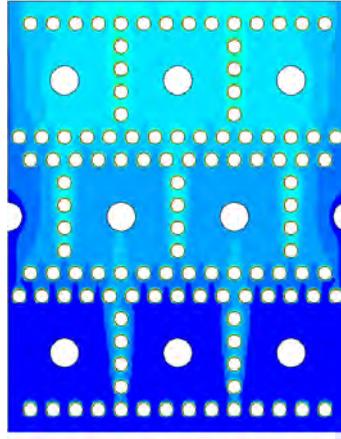
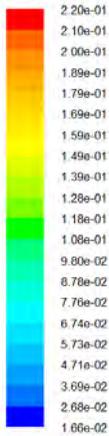
Gambar 4.5 Kontur Fraksi Massa H_2O pada variasi Temperatur Inlet 327 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (c) Susunan Batubara Acak 2.

Kontur fraksi massa H_2O pada temperatur inlet 327 K pada susunan batubara teratur, susunan batubara acak 1, maupun susunan batubara acak 2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Pada sisi outlet pada ketiga kontur fraksi massa H_2O tersebut menunjukkan kandungan air pada udara pengering yang lebih tinggi dibandingkan daerah sisi inlet. Hal ini disebabkan karena kandungan air di dalam batubara telah terbawa oleh udara pengering menuju ke sisi outlet sehingga semakin ke bagian atas chamber kandungan airnya akan semakin banyak.

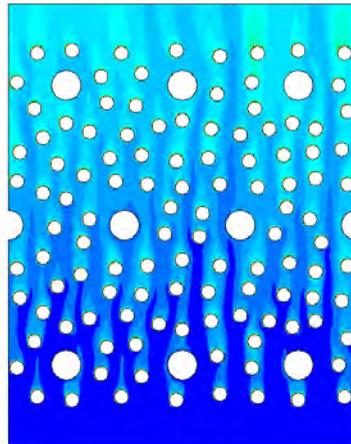
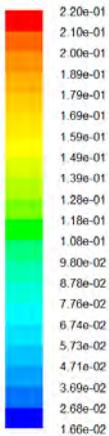
Pada proses pengeringan ini juga terjadi proses penurunan *moisture content* pada batubara, dimana udara pengering membawa kadar air pada batubara. Kadar air dalam udara akan naik sesaat setelah melewati dinding batubara. Perubahan *moisture content* adalah penurunan kadar air pada permukaan batubara dikarenakan aliran udara yang membawa kadar air tersebut. Hal tersebut terjadi pada seluruh kontur fraksi massa H_2O pada temperatur inlet 327 K di semua variasi susunan batubara. Sehingga susunan peletakan batubara tidak

mempengaruhi kontur fraksi massa H₂O udara pengering di dalam ruang pengering.

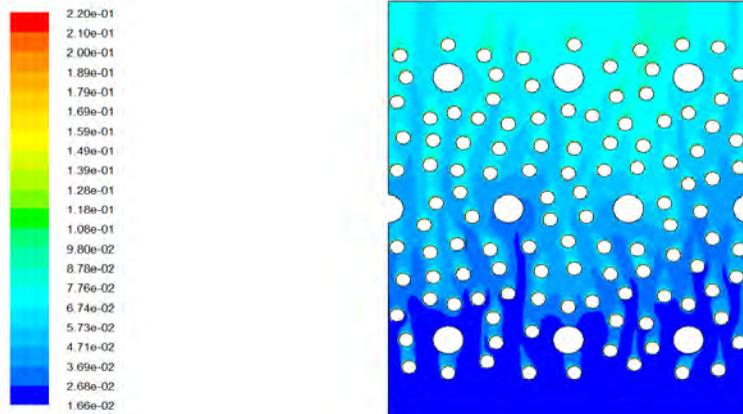
c. Temperatur Inlet 339 K



(a)



(b)



(c)

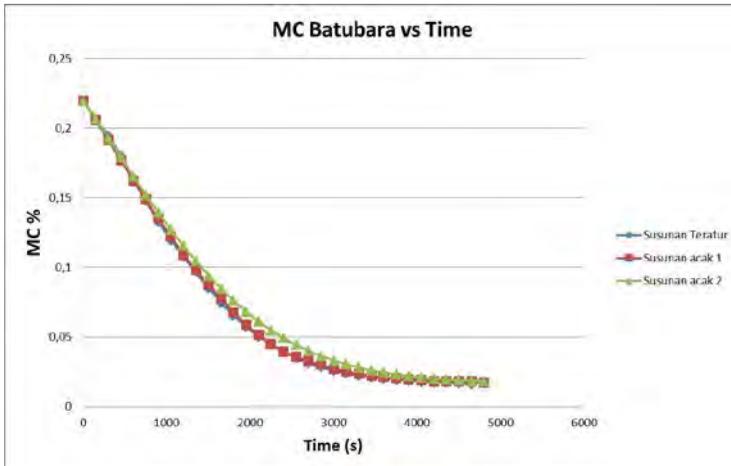
Gambar 4.6 Kontur Fraksi Massa H_2O pada variasi Temperatur Inlet 339 K (a) Susunan Batubara Teratur, (b) Susunan Batubara Acak 1 dan (b) Susunan Batubara Acak 2.

Kontur fraksi massa H_2O pada temperatur inlet 339 K pada susunan batubara teratur, susunan batubara acak 1, maupun susunan batubara acak 2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Pada sisi outlet pada ketiga kontur fraksi massa H_2O tersebut menunjukkan kandungan air pada udara pengering yang lebih tinggi dibandingkan daerah sisi inlet. Hal ini disebabkan karena kandungan air di dalam batubara telah terbawa oleh udara pengering menuju ke sisi outlet sehingga semakin ke bagian atas chamber kandungan airnya akan semakin banyak.

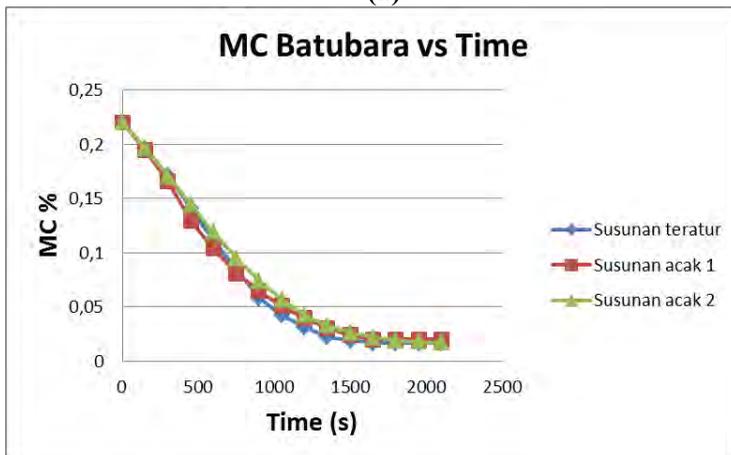
Pada proses pengeringan ini juga terjadi proses penurunan *moisture content* pada batubara, dimana udara pengering membawa kadar air pada batubara. Kadar air dalam udara akan naik sesaat setelah melewati dinding batubara. Perubahan *moisture content* adalah penurunan kadar air pada permukaan batubara dikarenakan aliran udara yang membawa kadar air tersebut. Hal tersebut terjadi pada seluruh kontur fraksi massa H_2O pada temperatur inlet 339 K di semua variasi susunan batubara. Sehingga susunan peletakan batubara tidak

mempengaruhi kontur fraksi massa H_2O udara pengering di dalam ruang pengering.

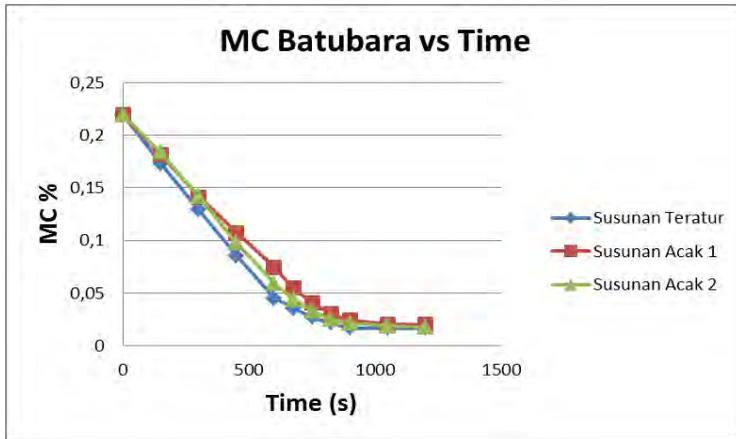
4.3.3 Analisa Drying Rate



(a)



(b)



(c)

Grafik 4.7 Laju pengurangan moisture content pada variasi Susunan Teratur, Acak 1, serta Acak 2 (a) Temperatur 316 K (b) Temperatur 327 K (c) Temperatur 339 K.

Pada saat perunningan pada *software Fluent* kondisi aliran di dalam ruang pengering dalam kondisi steady (keadaan dimana properties fluida pada suatu titik tertentu tidak terpengaruh oleh waktu). Namun dari grafik 4.7 diatas terlihat bahwa moisture content didalam batubara akan mengalami penurunan berdasarkan fungsi waktu, sehingga setiap penurunan moisture content pada batubara memiliki waktu yang berbeda-beda. Fungsi waktu yang digunakan dalam grafik ini didapat dari pengolahan data output hasil running pada *software Fluent*, dengan menggunakan rumus :

$$\Delta m_{H_2O} = n_A \cdot t$$

Dari grafik laju pengurangan moisture content diatas pada ketiga susunan batubara tersebut memiliki karakteristik yang sama. Perbedaan terletak pada posisi waktu yang berbeda, dimana temperatur 339 K memiliki waktu yang terpendek. Sedangkan temperatur 316 K, memiliki waktu telama untuk proses pengeringan. Dari grafik menunjukkan perubahan nilai yang

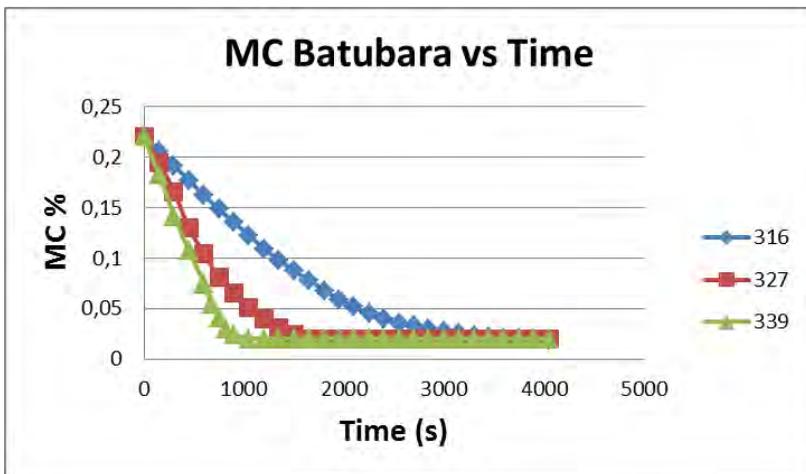
signifikan kemudian berubah menjadi landai. Proses pengeringan terjadi seharusnya dalam kurun waktu bagian yang signifikan tersebut.

Namun perbandingan trendline grafik penurunan moisture content antara ketiga variasi susunan tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Sehingga pengaruh dari variasi susunan peletakan batubara pada ruang pengering dapat diabaikan.

Selanjutnya dikarenakan variasi susunan batubara tidak berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara, maka untuk pembahasan-pembahasan baik kontur maupun grafik digunakan susunan acak 1 untuk mewakili susunan yang lain.

4.4 Analisa Grafik dan Psychometric Chart

4.4.1 Grafik Moisture Content pada Batubara terhadap Waktu pada Susunan Acak 1



Grafik 4.8 Hubungan Moisture Content pada Batubara dengan Waktu

Dalam grafik 4.14 terlihat bahwa tren grafik variasi temperatur inlet 316 K, 327 K, dan 339 K memiliki karakteristik yang sama. Perbedaan terletak pada posisi waktu yang berbeda, dimana temperatur 339 K memiliki waktu yang terpendek. Sedangkan temperatur 316 K, memiliki waktu terlama untuk proses pengeringan. Dari grafik menunjukkan perubahan nilai yang signifikan kemudian berubah menjadi landai. Proses pengeringan terjadi seharusnya dalam kurun waktu bagian yang signifikan tersebut.

Grafik diatas dibuat dengan menggunakan data yang sudah tampil pada software Fluent. Grafik diatas menunjukkan bahwa analisadari kandungan uap air pada udara pengering dan moisture content pada batubara yang semakin berkurang.

$$\Delta m_{H_2O} = n_A \cdot t$$

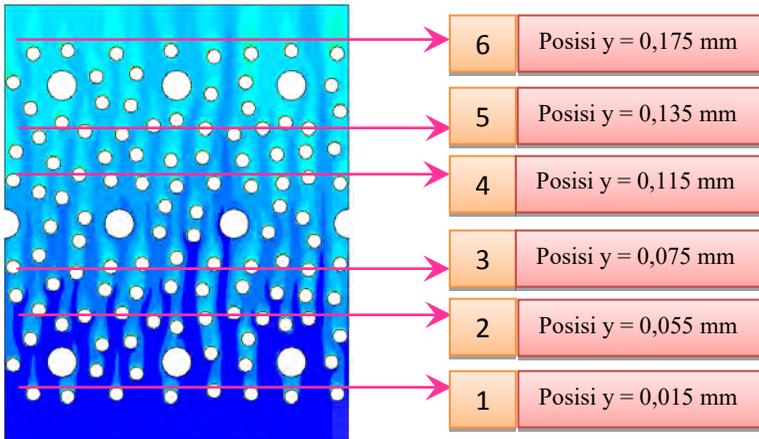
$$n_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{H_2O, coal} - \rho_{H_2O, inlet})$$

Sehingga seiring berjalannya waktu maka semakin besar perubahan moisture content pada batubara. Penurunan moisture content akan berhenti pada saat udara pengering tidak dapat mengambil kadar air dari batubara tersebut. Selain itu dilihat dari teori di atas, nilai koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi nilai fluks perpindahan massa. Nilai koefisien perpindahan massa berbanding lurus dengan *moisture content* batubara terhadap waktu pengeringan sehingga ketika nilai perpindahan massa meningkat akan diikuti dengan peningkatan fluks perpindahan massa. Peningkatan perpindahan massa akan diikuti dengan pengurangan *moisture content* batubara yang signifikan

4.4.2 Analisa Psychometric Chart

Dalam mengolah psychometric chart digunakan *software psychart 1.1.6.0*. Data yang digunakan sebagai input dalam psychometric chart didapatkan dari hasil running dalam *software*

Fluent 6.3.26 dari pemodelan susunan batubara acak 1 yang kemudian diperoleh dari beberapa titik di sepanjang *Drying Chamber*. Berikut adalah posisi titik pengambilan data pada ruang pengering batubara.



Gambar 4.9 Posisi pengambilan data input untuk *psychometric chart*

Untuk mengambil data sebagai input dalam *psychometric chart* maka digunakan data pada hasil iterasi pada beberapa posisi dalam ruang pengering sehingga didapatkan data seperti dibawah ini.

Tabel 4.1 Properti Udara pada Temperatur Inlet 316 K

TITIK	Temperatur	Relative Humidity	Humidity Ratio
	K	%	kg H ₂ O/kg udara kering
1	315,83	31,6	0,017
2	318,12	28,4	0,0172
3	314,5	55,1	0,0281
4	316,89	50,4	0,0292

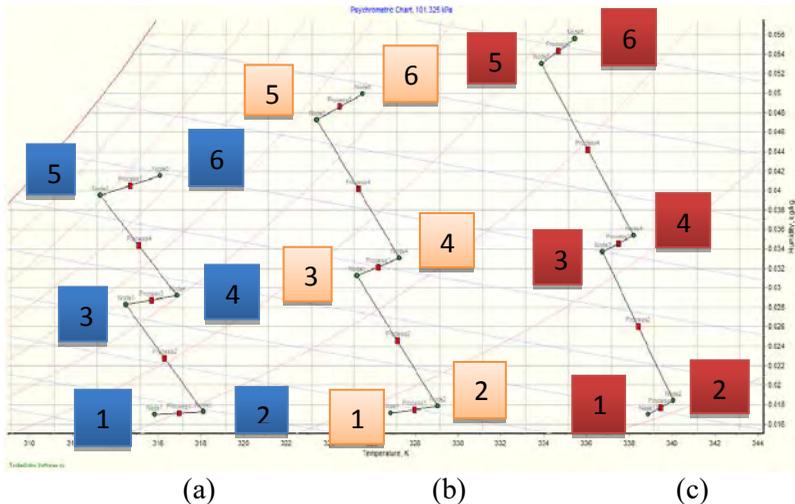
5	313,31	80,9	0,0395
6	316,08	73,3	0,0415

Tabel 4.2 Properti Udara pada Temperatur Inlet 327 K

TITIK	Temperatur	Relative Humidity	Humidity Ratio
	K	%	kg H ₂ O/kg udara kering
1	326,87	18,3	0,017
2	329,05	17,1	0,0179
3	325,3	35,2	0,0312
4	327,26	33,7	0,0331
5	323,42	56,9	0,0473
6	325,54	54	0,0499

Tabel 4.3 Properti Udara pada Temperatur Inlet 339 K

TITIK	Temperatur	Relative Humidity	Humidity Ratio
	K	%	kg H ₂ O/kg udara kering
1	338,87	10,4	0,017
2	340,05	10,6	0,0184
3	336,76	22,1	0,0337
4	338,21	21,6	0,0354
5	333,89	38,4	0,053
6	335,48	37,3	0,0556



(a) (b) (c)
 Gambar 4.10 Diagram Psikometrik gabungan untuk ketiga variasi temperatur (a) Temperatur 316 K (b) Temperatur 327 K (c) Temperatur 339 K

Dalam diagram psikometrik seperti gambar 4.10 ketiga variasi temperatur yaitu 316 K, 327 K, dan 339 K digabungkan menjadi satu diagram, agar ketiga variasi temperatur tersebut dapat dengan mudah dibandingkan. Berikut penjelasan tentang diagram psikometrik gabungan di atas :

➤ Proses 1-2 (Heating dan Humidifying)

Proses pemanasan yang dialami oleh udara akibat bersinggungan dengan *tube heater* dan juga terjadi kenaikan humidity ratio pada udara karena selain dengan tube heater udara pengering juga bersinggungan dengan batubara namun kenaikan humidity ratio tersebut tidak akan lebih besar disbanding dengan proses 2-3 dikarenakan udara pengering pada proses ini tidak melewati batubara sebanyak yang ada dalam proses 2-3.

Pada proses ini temperatur 316 K memiliki gradien garis yang paling landai, hal ini disebabkan kenaikan humidity ratio

pada temperatur 316 K tidak sebesar kenaikan humidity ratio pada temperatur lainnya dan juga pada temperatur 316 K terjadi kenaikan temperatur yang paling besar dibandingkan temperatur yang lain. Sedangkan temperatur 339 K memiliki gradient garis yang paling curam, hal ini disebabkan semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi pula kemampuan udara dalam menyerap air di dalam batubara. Sehingga pada temperatur 339 K memiliki kenaikan kandungan air di udara pengering yang paling banyak.

➤ Proses 2-3 (Cooling dan Humidifying)

Terjadi proses pengeringan yaitu proses penyerapan moisture content dari batubara ke udara pengering akibat *Relative Humidity* dari udara yang lebih kecil dibandingkan batubara yang diikuti dengan naiknya nilai humidity ratio dan turunnya temperatur udara pengering akibat bersentuhan dengan batubara. Pada proses ini udara pengering hanya melewati batubara saja.

Pada proses 2 ke 3 kenaikan humidity ratio yang paling besar dialami oleh temperatur yang paling tinggi yaitu 339 K. Hal ini disebabkan karena pada temperatur udara pengering yang lebih tinggi memiliki kemampuan menyerap uap air dari batubara yang paling besar, sehingga nantinya pada temperatur tertinggi memiliki kandungan air di udara pengering yang paling besar dibandingkan pada temperatur lainnya.

➤ Proses 3-4 (Heating dan Humidifying)

Proses pemanasan yang dialami oleh udara akibat bersinggungan dengan *tube heater* dan juga terjadi kenaikan kadar air pada udara karena juga bersinggungan dengan batubara. Namun, proses ini mengalami kenaikan kadar air yang lebih besar dibandingkan dengan proses 1-2. Fenomena ini terjadi karena semakin ke atas kadar air pada udara pengering yang didapat dari batubara sudah mulai terkonsentrasi dan terakumulasi dari proses-proses sebelumnya. Dan juga terjadi kenaikan temperatur yang lebih besar dibandingkan proses 1-2.

➤ Proses 4-5 (Cooling dan Humidifying)

Proses ini sama dengan proses 2-3 (*cooling dan humidifying*) yang dilakukan udara untuk mengeringkan batubara yaitu proses penyerapan moisture content dari batubara ke udara pengering akibat *Relative Humidity* dari udara yang lebih kecil dibandingkan batubara yang diikuti dengan naiknya nilai humidity ratio dan turunnya temperatur udara pengering akibat bersentuhan dengan batubara.

Pada proses ini kenaikan humidity ratio yang paling besar dialami oleh temperatur yang paling tinggi yaitu 339 K. Hal ini disebabkan karena pada temperatur udara pengering yang lebih tinggi memiliki kemampuan menyerap uap air dari batubara yang paling besar, sehingga nantinya pada temperatur tertinggi memiliki kandungan air di udara pengering yang paling besar dibandingkan pada temperatur lainnya.

➤ Proses 5-6 (Heating dan Humidifying)

Proses yang terjadi pada titik 5 ke titik 6 ini sama seperti proses 1-2. Proses yang terjadi adalah pemanasan yang dialami oleh udara akibat bersinggungan dengan *tube heater* dan juga terjadi kenaikan humidity ratio pada udara karena selain dengan *tube heater* udara pengering juga bersinggungan dengan batubara.

Terlihat pada proses akhir pengeringan ini kandungan air pada udara pengering lebih banyak terdapat pada temperatur tertinggi yaitu temperatur 339 K. Sehingga hal tersebut sesuai dengan fenomena yang terjadi pada bahasan sebelumnya bahwa semakin tinggi temperatur udara pengering, air yang teruapkan dari batubara semakin besar karena kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara lebih baik dibandingkan dengan kemampuan menyerap air dari temperatur udara pengering yang lebih rendah. Sehingga laju pengeringan batubara juga lebih baik dialami oleh udara pengering dengan temperatur tertinggi.

Dari hasil analisa psychrometric chart terdapat fenomena yang terjadi pada proses *heating* hasil pemanasan *tube heater*. Pada umumnya proses *heating* tidak diikuti dengan proses

peningkatan *humidity ratio*, akan tetapi dalam penelitian ini didapatkan fakta bahwa terjadi peningkatan *humidity ratio* akibat akumulasi dari *moisture content* batubara di sekitar *tube heater*.

Sesuai dengan perumusan,

$$q = h \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_c)$$

$$n_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{s,c} - \rho_{\infty})$$

$$P = \rho \cdot R \cdot T$$

$$\rho \sim \frac{1}{T}$$

Nilai massa jenis berbanding terbalik dengan temperatur. Semakin besar temperatur udara pengering, maka semakin rendah massa jenisnya. Nilai massa jenis udara yang rendah membuat selisihnya dengan massa jenis *coal* semakin besar. Temperatur *air heater* 339 K memberikan nilai massa jenis udara yang rendah tapi selisih massa jenis *coal* dengan udara akan besar, sehingga memberikan laju perpindahan massa yang besar. Dengan kata lain, temperatur *air heater* 339 K memiliki laju perpindahan panas sekaligus laju perpindahan massa yang paling besar. Sebaliknya, temperatur *air heater* 316 K memiliki laju perpindahan panas dan massa yang paling rendah.

Pada konsep perpindahan massa, berlaku perumusan sebagai berikut:

$$n_{A^*} = h_m \cdot (\rho_{H_2O,coal} - \rho_{H_2O,inlet})$$

$$n_{A^*} = (w_2 - w_1) \cdot \dot{\rho}_{udara} \cdot v$$

$$w_2 = w_{outlet}, w_1 = w_{inlet}$$

Dari teori di atas, dapat dikatakan bahwa laju perpindahan massa dari permukaan batubara harus sebanding dengan laju perpindahan massa yang diterima oleh udara pengering. Proses difusi di dalam batubara diabaikan, sehingga proses yang terjadi yaitu perpindahan *moisture content* dari batubara ke udara pengering. Hal ini dapat terjadi karena *relative humidity* udara lebih kecil daripada *relative humidity* batubara.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dalam penelitian secara numerik melalui software *Fluent 6.3.26* untuk simulasi *coal dryer* dengan susunan *tube heater* secara *staggered* dan variasi temperature inlet 316 K, 327 K, serta 339 K menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Posisi peletakan batubara pada ruang pengering tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap laju pengeringan batubara, hal ini terlihat dari perbandingan kontur temperature, kontur fraksi massa H₂O, dan juga grafik laju penurunan moisture content antara 3 variasi susunan batubara tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.
2. Grafik laju pengeringan pada temperature udara inlet 339 K memiliki trendline yang paling baik dengan penurunan moisture content hingga 1,6 % diikuti dengan grafik laju pengeringan temperature inlet 327 K dengan penurunan moisture content sampai 1,7% dan temperatur inlet 316 K memiliki grafik laju pengeringan terendah dimana penurunan moisture contentnya hanya sampai 10,9% pada waktu yang sama.
3. Semakin besar nilai temperatur inlet, maka nilai laju perpindahan massa semakin baik. Hal ini dibuktikan dengan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk proses pengeringan lebih rendah pada temperatur inlet 339 K yaitu 1100 sekon, sedangkan pada Temperatur inlet 327 K lama waktu pengeringan yang dibutuhkan 2000 sekon, dan temperature inlet 316 K memiliki waktu yang paling lama yaitu 4600 sekon.
4. Pada grafik laju pengeringan terlihat bahwa grafik bergerak secara signifikan ke bawah sampai pada titik tertentu, kemudian grafik bergerak konstan. Pada posisi ini, dapat

digunakan sebagai pertimbangan untuk menghentikan proses pengeringan.

5. Proses *heating* pada *tube heater* dengan susunan *staggered* mengakibatkan proses *heating* disertai humidifikasi dimana terjadi peningkatan temperatur udara sekitar *tube heater* serta diikuti dengan peningkatan *humidity ratio* udara sekitar *tube heater*

5.2 Saran

1. Untuk pemodelan secara numerik dapat dilakukan dengan metodologi yang memperlihatkan bahwa adanya perpindahan massa dari dalam batubara, bukan hanya di permukaan saja.
2. Metodologi dalam penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan iterasi yang didiskritkan melalui perubahan *moisture content* pada batubara.
3. Pemodelan numerik bisa dilakukan dengan domain yang cukup besar, sehingga akan muncul karakteristik pengeringan pada setiap peletakkan batubara.
4. Perlu dibuat kajian studi eksperimen dengan kondisi yang sama dengan studi numerik supaya dapat dibandingkan dengan kondisi sebenarnya.

LAMPIRAN 1

1. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 1
(Temperatur 316 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_{p\ coal}$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
316	301	0,22	390,7457	0,0454	1,093524	1063,86	2,88E-05	0,057001	0,066115
316	313,009	0,057001	270,8647	0,0454	1,094299	1052,05	2,88E-05	0,049281	0,064749
316	313,571	0,049281	246,2946	0,0454	1,095112	1049,45	2,88E-05	0,042695	0,054311
316	313,956	0,042695	208,9641	0,0454	1,095942	1046,84	2,88E-05	0,040104	0,047873
316	314,548	0,040104	185,6587	0,0454	1,096773	1044,27	2,88E-05	0,037556	0,04449
316	314,783	0,037556	148,8387	0,0454	1,097589	1041,81	2,88E-05	0,035109	0,041241
316	314,905	0,035109	109,4079	0,0454	1,098369	1039,48	2,88E-05	0,0328	0,038161
316	315,112	0,0328	90,1712	0,0454	1,099106	1037,32	2,88E-05	0,030655	0,035314
316	315,303	0,030655	74,40586	0,0454	1,099792	1035,34	2,88E-05	0,028689	0,032694
316	315,475	0,028689	69,6073	0,0454	1,100418	1033,55	2,88E-05	0,026916	0,030331
316	315,629	0,026916	57,31266	0,0454	1,100981	1031,96	2,88E-05	0,02509	0,028234
316	315,765	0,02509	47,7521	0,0454	1,101481	1030,56	2,88E-05	0,023949	0,026443
316	315,872	0,023949	38,65055	0,0454	1,101921	1029,35	2,88E-05	0,022743	0,024781
316	315,986	0,022743	30,66921	0,0454	1,102302	1028,3	2,88E-05	0,021704	0,0234
316	316,073	0,021704	25,91708	0,0454	1,102627	1027,41	2,88E-05	0,020818	0,022219
316	316,147	0,020818	21,17661	0,0454	1,102906	1026,65	2,88E-05	0,020066	0,021219
316	316,21	0,020066	17,29858	0,0454	1,10314	1026,01	2,88E-05	0,019435	0,02038
316	316,263	0,019435	16,1085	0,0454	1,103336	1025,48	2,88E-05	0,018907	0,019677
316	316,307	0,018907	11,49786	0,0454	1,1035	1025,04	2,88E-05	0,018468	0,019092
316	316,343	0,018468	9,361968	0,0454	1,103637	1024,67	2,88E-05	0,018104	0,018607
316	316,373	0,018104	7,616664	0,0454	1,103749	1024,37	2,88E-05	0,017804	0,018208
316	316,398	0,017804	6,191674	0,0454	1,103842	1024,12	2,88E-05	0,017557	0,017879
316	316,465	0,017557	5,031188	0,0454	1,103918	1023,92	2,88E-05	0,017354	0,017609
316	316,489	0,017354	4,08569	0,0454	1,10398	1023,75	2,88E-05	0,017188	0,017388
316	316,499	0,017188	3,315802	0,0454	1,104031	1023,61	2,88E-05	0,017053	0,017208
316	316,501	0,017053	2,689542	0,0454	1,104072	1023,5	2,88E-05	0,016942	0,01706
316	316,521	0,016942	2,181401	0,0454	1,104106	1023,41	2,88E-05	0,016853	0,016941
316	316,535	0,016853	1,770008	0,0454	1,104133	1023,34	2,88E-05	0,01678	0,016843
316	316,548	0,01678	1,433786	0,0454	1,104155	1023,28	2,88E-05	0,01672	0,016764
316	316,561	0,01672	1,160452	0,0454	1,104174	1023,23	2,88E-05	0,016672	0,0167

2. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 1 (Temperatur 327 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_{p\ coal}$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
327	301	0,22	602,2936	0,0454	1,033905	1095,24	2,88E-05	0,056067	0,065023
327	320,279	0,056067	401,0226	0,0454	1,0344	1064,25	2,88E-05	0,040086	0,061834
327	323,319	0,040086	262,5213	0,0454	1,034524	1058,25	2,88E-05	0,038085	0,045185
327	324,115	0,038085	169,3146	0,0454	1,035128	1057,09	2,88E-05	0,035093	0,038554
327	324,889	0,035093	106,9697	0,0454	1,035755	1056,87	2,88E-05	0,028514	0,032458
327	325,583	0,028514	65,8771	0,0454	1,036332	1056,83	2,88E-05	0,024225	0,025965
327	326,152	0,024225	39,39614	0,0454	1,036803	1056,75	2,88E-05	0,021747	0,023454
327	326,581	0,021747	22,89297	0,0454	1,037144	1056,67	2,88E-05	0,019696	0,020726
327	326,879	0,019696	12,97018	0,0454	1,037368	1056,67	2,88E-05	0,018371	0,0184
327	327,07	0,018371	9,200616	0,0454	1,037594	1056,66	2,88E-05	0,018064	0,017894
327	327,187	0,018064	3,934243	0,0454	1,037608	1056,58	2,88E-05	0,017105	0,016939
327	327,254	0,017105	2,124253	0,0454	1,037624	1056,55	2,88E-05	0,016874	0,016932
327	327,292	0,016874	1,134868	0,0454	1,037646	1056,45	2,88E-05	0,016784	0,016656
327	327,313	0,016784	0,601299	0,0454	1,037658	1056,25	2,88E-05	0,016745	0,016603

3. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 1 (Temperatur 339 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_{p\ coal}$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
339	301	0,22	848,262	0,0454	1,007459	1095,14	2,88E-05	0,055966	0,064934
339	328,737	0,055966	356,2459	0,0454	1,005006	1064,17	2,88E-05	0,040524	0,048421
339	330,847	0,040524	156,2719	0,0454	1,003126	1060,91	2,88E-05	0,02439	0,037408
339	336,545	0,02439	74,0844	0,0454	1,002101	1058,59	2,88E-05	0,024144	0,026958
339	337,454	0,024144	15,77899	0,0454	1,001086	1058,57	2,88E-05	0,018998	0,019794
339	338,536	0,018998	10,92552	0,0454	1,001006	1058,22	2,88E-05	0,018034	0,018362
339	338,841	0,018034	5,89339	0,0454	0,998449	1057,49	2,88E-05	0,017318	0,01756
339	338,979	0,017318	3,814147	0,0454	0,997619	1057,09	2,88E-05	0,016866	0,016928
339	339,035	0,016866	0,936377	0,0454	0,997456	1056,87	2,88E-05	0,016642	0,016655
339	339,132	0,016642	0,39983	0,0454	0,997303	1056,87	2,88E-05	0,016642	0,016654

4. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 2 (Temperatur 316 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_{p\ coal}$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
316	301	0,22	392,6872	0,0454	1,087833	1073,55	0,0000288	0,0666122	0,0627251
316	311,908	0,066612	324,0075	0,0454	1,088713	1070,72	0,0000288	0,0661946	0,0572068
316	311,987	0,066195	281,7203	0,0454	1,089795	1069,1	0,0000288	0,0621939	0,054309
316	312,148	0,062194	254,4723	0,0454	1,090835	1065,45	0,0000288	0,0585799	0,0507301
316	312,508	0,05858	201,1623	0,0454	1,092014	1061,69	0,0000288	0,054842	0,0481561
316	312,852	0,054842	183,1265	0,0454	1,093174	1057,88	0,0000288	0,051063	0,0452298
316	313,213	0,051063	156,9068	0,0454	1,09421	1054,49	0,0000288	0,0476952	0,0423261
316	313,536	0,047695	144,4508	0,0454	1,095216	1051,18	0,0000288	0,0444149	0,039227
316	313,853	0,044415	115,3539	0,0454	1,096258	1047,87	0,0000288	0,0411253	0,0368813
316	314,164	0,041125	98,38692	0,0454	1,097147	1044,93	0,0000288	0,038206	0,0344166
316	314,452	0,038206	83,69069	0,0454	1,097994	1042,19	0,0000288	0,03549	0,0320418
316	314,716	0,03549	71,57747	0,0454	1,098844	1039,5	0,0000288	0,0328202	0,027943
316	314,971	0,03282	67,31796	0,0454	1,099541	1035,64	0,0000288	0,028989	0,0281838
316	315,178	0,028989	60,64717	0,0454	1,099858	1035,23	0,0000288	0,0285872	0,0265851
316	315,37	0,028587	52,85079	0,0454	1,100775	1033,41	0,0000288	0,0267808	0,0251254
316	315,399	0,026781	45,97069	0,0454	1,101262	1031,83	0,0000288	0,0252104	0,0237781
316	315,709	0,02521	30,35051	0,0454	1,10166	1030,42	0,0000288	0,0238131	0,0226466
316	315,859	0,023813	24,94079	0,0454	1,102047	1029,25	0,0000288	0,0226448	0,0215929
316	315,969	0,022645	20,92678	0,0454	1,102381	1028,21	0,0000288	0,0216177	0,0207189
316	316,085	0,021618	17,58185	0,0454	1,102477	1027,37	0,0000288	0,020782	0,0194445
316	316,198	0,020782	15,02991	0,0454	1,102756	1026,22	0,0000288	0,0196433	0,0193078
316	316,259	0,019643	11,54846	0,0454	1,102806	1025,9	0,0000288	0,0193228	0,0188389
316	316,33	0,019323	9,271677	0,0454	1,102854	1025,37	0,0000288	0,0188003	0,0184144
316	316,377	0,0188	7,742813	0,0454	1,102865	1024,95	0,0000288	0,0183769	0,0180759
316	316,442	0,018377	6,285066	0,0454	1,102877	1024,59	0,0000288	0,018022	0,0177787
316	316,472	0,018022	5,160525	0,0454	1,102898	1024,3	0,0000288	0,0177364	0,0175341
316	316,609	0,017736	4,179824	0,0454	1,102907	1023,91	0,0000288	0,0175453	0,0172932
316	316,743	0,017545	4,163002	0,0454	1,102935	1023,86	0,0000288	0,017295	0,0171766
316	316,754	0,017295	2,507955	0,0454	1,102954	1023,34	0,0000288	0,0171476	0,0171528
316	316,771	0,017148	0,063582	0,0454	1,102955	1023,32	0,0000288	0,0170284	0,0169533
316	316,784	0,017028	0,05672	0,0454	1,10296	1023,28	0,0000288	0,0169331	0,0168688

5. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 2
(Temperatur 327 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_{p\ coal}$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
327	301	0,22	647,1228	0,0454	1,063179	1073,43	0,0000288	0,0664935	0,0630266
327	319,167	0,066494	478,6551	0,0454	1,064263	1065,83	0,0000288	0,0578055	0,0566848
327	320,221	0,057805	335,177	0,0454	1,0649	1058,64	0,0000288	0,05082	0,0443254
327	321,385	0,05082	208,2359	0,0454	1,06512	1055,37	0,0000288	0,0465759	0,0425122
327	321,933	0,046576	155,9581	0,0454	1,065776	1047,1	0,0000288	0,0413556	0,037201
327	323,106	0,041356	86,42422	0,0454	1,066325	1041,71	0,0000288	0,0350116	0,0316467
327	324,154	0,035012	60,33091	0,0454	1,066832	1036,14	0,0000288	0,0294844	0,0272045
327	325,061	0,029484	45,50747	0,0454	1,066842	1035,52	0,0000288	0,028868	0,0235808
327	325,818	0,028868	21,85868	0,0454	1,066859	1026,2	0,0000288	0,0196165	0,0208981
327	326,403	0,019616	16,22621	0,0454	1,06687	1026,17	0,0000288	0,0195867	0,0190898
327	326,839	0,019587	9,055087	0,0454	1,066901	1024,78	0,0000288	0,0182149	0,01792
327	327,364	0,018215	5,332943	0,0454	1,066952	1023,9	0,0000288	0,017394	0,0172778

6. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 2
(Temperatur 339 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_{p\ coal}$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
339	301	0,22	915,1092	0,0454	1,037845	1073,38	0,0000288	0,066446	0,0631522
339	326,985	0,066446	424,4342	0,0454	1,037292	1066,45	0,0000288	0,0595711	0,0513842
339	328,466	0,059571	186,9371	0,0454	1,03567	1054,32	0,0000288	0,0465399	0,0415806
339	330,519	0,04654	98,6665	0,0454	1,034028	1035,44	0,0000288	0,0387889	0,0313587
339	333,302	0,038789	50,16034	0,0454	1,032615	1031,14	0,0000288	0,0245286	0,0230431
339	336,833	0,024529	24,63951	0,0454	1,031717	1026,15	0,0000288	0,0195738	0,0205739
339	338,128	0,019574	17,43163	0,0454	1,031378	1023,88	0,0000288	0,0182781	0,0193676
339	338,299	0,018278	6,132839	0,0454	1,030954	1024,48	0,0000288	0,0173224	0,0176864
339	338,913	0,017322	1,071247	0,0454	1,030424	1023,33	0,0000288	0,0171697	0,0167577
339	338,962	0,01717	0,059712	0,0454	1,030256	1023,19	0,0000288	0,01716	0,0166326

7. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 3 (Temperatur 316 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_{p\ coal}$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
316	301	0,22	377,0157	0,0454	1,088271	1074,71	2,88E-05	0,067768	0,064197
316	311,577	0,067768	332,9712	0,0454	1,089258	1071,28	2,88E-05	0,064367	0,058797
316	311,909	0,064367	289,838	0,0454	1,090327	1067,74	2,88E-05	0,06085	0,057214
316	312,241	0,06085	251,9693	0,0454	1,091372	1064,34	2,88E-05	0,057475	0,054385
316	312,556	0,057475	220,1683	0,0454	1,092389	1060,91	2,88E-05	0,05407	0,051308
316	312,887	0,05407	191,3685	0,0454	1,093416	1057,55	2,88E-05	0,050737	0,048447
316	313,204	0,050737	165,8957	0,0454	1,094432	1054,32	2,88E-05	0,047533	0,045734
316	313,502	0,047533	144,0981	0,0454	1,095378	1051,25	2,88E-05	0,044479	0,042558
316	313,795	0,044479	124,8601	0,0454	1,096297	1048,29	2,88E-05	0,041548	0,040043
316	314,074	0,041548	107,5867	0,0454	1,09718	1045,5	2,88E-05	0,038773	0,037386
316	314,337	0,038773	92,55703	0,0454	1,098001	1042,91	2,88E-05	0,03621	0,034841
316	314,579	0,03621	79,88691	0,0454	1,09876	1040,45	2,88E-05	0,033761	0,03273
316	314,819	0,033761	68,54115	0,0454	1,099395	1038,4	2,88E-05	0,031725	0,03092
316	315,018	0,031725	58,51614	0,0454	1,100081	1036,3	2,88E-05	0,029642	0,028771
316	315,212	0,029642	49,81724	0,0454	1,100644	1034,49	2,88E-05	0,027851	0,027096
316	315,388	0,027851	42,39189	0,0454	1,101138	1032,89	2,88E-05	0,026257	0,02558
316	315,546	0,026257	36,06668	0,0454	1,101562	1031,5	2,88E-05	0,024877	0,024415
316	315,685	0,024877	30,30152	0,0454	1,101991	1030,21	2,88E-05	0,023602	0,023124
316	315,803	0,023602	25,76678	0,0454	1,102297	1029,15	2,88E-05	0,022547	0,022184
316	315,915	0,022547	21,65815	0,0454	1,10261	1028,16	2,88E-05	0,021568	0,021325
316	316,011	0,021568	18,24849	0,0454	1,102834	1027,39	2,88E-05	0,020799	0,020554
316	316,092	0,020799	15,27504	0,0454	1,103046	1026,69	2,88E-05	0,020104	0,019885
316	316,163	0,020104	12,8177	0,0454	1,103215	1026,08	2,88E-05	0,019505	0,019323
316	316,228	0,019505	10,62975	0,0454	1,103366	1025,58	2,88E-05	0,019004	0,018867
316	316,28	0,019004	8,82039	0,0454	1,103491	1025,15	2,88E-05	0,018583	0,018471
316	316,324	0,018583	7,347119	0,0454	1,103587	1024,8	2,88E-05	0,01823	0,01814
316	316,364	0,01823	6,03003	0,0454	1,103679	1024,5	2,88E-05	0,017931	0,017857
316	316,394	0,017931	4,883827	0,0454	1,103764	1024,25	2,88E-05	0,017682	0,017607
316	316,418	0,017682	3,944007	0,0454	1,103834	1024,04	2,88E-05	0,017478	0,017413
316	316,436	0,017478	3,266565	0,0454	1,103874	1023,87	2,88E-05	0,017311	0,017259
316	316,457	0,017311	2,684478	0,0454	1,103909	1023,73	2,88E-05	0,017173	0,017131
316	316,473	0,017173	2,14726	0,0454	1,103948	1023,62	2,88E-05	0,017059	0,017024

8. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 3 (Temperatur 327 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_p\ coal$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
327	301	0,22	627,5168	0,0454	1,063533	1074,64	2,88E-05	0,067694	0,064075
327	318,844	0,067694	463,4398	0,0454	1,064016	1068,64	2,88E-05	0,06174	0,058534
327	319,801	0,06174	337,4109	0,0454	1,064569	1062,14	2,88E-05	0,055294	0,052892
327	320,837	0,055294	252,0145	0,0454	1,064892	1056,11	2,88E-05	0,049303	0,047406
327	321,865	0,049303	174,1332	0,0454	1,065732	1049,03	2,88E-05	0,042282	0,040532
327	322,943	0,042282	122,5131	0,0454	1,066289	1042,98	2,88E-05	0,036273	0,034984
327	323,923	0,036273	84,24889	0,0454	1,066767	1037,68	2,88E-05	0,031016	0,030054
327	324,79	0,031016	56,76289	0,0454	1,067127	1033,25	2,88E-05	0,026615	0,025568
327	325,533	0,026615	36,05648	0,0454	1,067407	1029,73	2,88E-05	0,023126	0,022717
327	326,127	0,023126	22,80586	0,0454	1,06753	1027,28	2,88E-05	0,020691	0,020332
327	326,566	0,020691	13,62391	0,0454	1,067579	1025,55	2,88E-05	0,018973	0,018824
327	326,888	0,018973	7,635075	0,0454	1,067641	1024,48	2,88E-05	0,017915	0,017825
327	327,077	0,017915	4,246537	0,0454	1,067638	1023,86	2,88E-05	0,017295	0,017254
327	327,199	0,017295	2,246332	0,0454	1,067628	1023,5	2,88E-05	0,016946	0,016922

9. Tabel Data Hasil Running Fluent pada Susunan 3 (Temperatur 339 K)

T_{inlet}	T_{coal}	$Y_{coal\ awal}$	h	k	ρ_{coal}	$C_p\ coal$	D_{AB}	$Y_{coal\ akhir}$	Y_{outlet}
339	301	0,22	890,4058	0,0454	1,038207	1074,63	2,88E-05	0,067688	0,064057
339	326,644	0,067688	509,6302	0,0454	1,036967	1065,46	2,88E-05	0,058583	0,056042
339	328,761	0,058583	285,2197	0,0454	1,03559	1054,75	2,88E-05	0,04796	0,04594
339	331,243	0,04796	150,4708	0,0454	1,034209	1043,69	2,88E-05	0,036976	0,035636
339	333,835	0,036976	73,76187	0,0454	1,032783	1034,29	2,88E-05	0,027652	0,026
339	336,151	0,027652	43,98243	0,0454	1,032199	1030,04	2,88E-05	0,023434	0,022494
339	337,189	0,023434	26,36005	0,0454	1,031652	1027,27	2,88E-05	0,020681	0,019941
339	337,925	0,020681	14,14209	0,0454	1,031204	1025,31	2,88E-05	0,018737	0,018581
339	338,466	0,018737	7,857645	0,0454	1,030915	1024,29	2,88E-05	0,017729	0,01763
339	338,766	0,017729	4,017241	0,0454	1,030709	1023,69	2,88E-05	0,017133	0,017046

LAMPIRAN 2

1. Tabel Data Hasil Perhitungan Susunan 1 (Temperatur 316 K)

$Y_{H_2O \text{ coal}}$	h_m	n''_A	n_A	Δm_{H_2O}	time
0,22	0,274293	0,002371	2,84208E-05	0,049525	1742,565
0,057001	0,190803	0,001949	2,33681E-05	0,048159	2210,903
0,049281	0,173596	0,002005	2,40391E-05	0,037721	1869,14
0,042695	0,147369	0,001962	2,35173E-05	0,031283	1780,198
0,040104	0,131008	0,002018	2,41966E-05	0,0279	1753,057
0,037556	0,105083	0,001863	2,23363E-05	0,024651	1853,637
0,035109	0,077283	0,001545	1,85237E-05	0,021571	2064,482
0,0328	0,063725	0,001401	1,68005E-05	0,018724	2164,474
0,030655	0,052606	0,00126	1,50997E-05	0,016104	2266,525
0,028689	0,049232	0,001272	1,52458E-05	0,013741	2251,316
0,026916	0,04055	0,001131	1,35555E-05	0,011644	2359,007
0,02509	0,033796	0,001007	1,20754E-05	0,009853	2465,982
0,023949	0,027362	0,000864	1,03577E-05	0,008191	2590,819
0,022743	0,021716	0,00072	8,63482E-06	0,00681	2738,671
0,021704	0,018355	0,000634	7,59923E-06	0,005629	2840,743
0,020818	0,015	0,000537	6,43406E-06	0,004629	2969,393
0,020066	0,012255	0,000452	5,41462E-06	0,00379	3099,969
0,019435	0,011413	0,000431	5,16857E-06	0,003087	3147,279

0,018907	0,008147	0,000315	3,77644E-06	0,002502	3362,528
0,018468	0,006634	0,000261	3,12532E-06	0,002017	3495,516
0,018104	0,005398	0,000215	2,57682E-06	0,001618	3627,736
0,017804	0,004388	0,000177	2,11769E-06	0,001289	3758,499
0,017557	0,003566	0,000145	1,73756E-06	0,001019	3886,321
0,017354	0,002896	0,000119	1,42234E-06	0,000798	4010,975
0,017188	0,00235	9,69E-05	1,16172E-06	0,000618	4131,556

2. Tabel Data Hasil Perhitungan Susunan 1 (Temperatur 327 K)

$Y_{H_2O \text{ coal}}$	h_m	n''_A	n_A	Δm_{H_2O}	time
0,22	0,426615	0,003951	4,73602E-05	0,048433	1022,642
0,056067	0,286736	0,003943	4,72658E-05	0,045244	1107,216
0,040086	0,188052	0,00363	4,35193E-05	0,028595	957,0539
0,038085	0,121306	0,003357	4,0243E-05	0,021964	995,7893
0,035093	0,076629	0,002867	3,43746E-05	0,015868	1061,624
0,028514	0,047184	0,002258	2,70642E-05	0,009375	1096,39
0,024225	0,028213	0,001679	2,01239E-05	0,006864	1241,093
0,021747	0,016393	0,00111	1,33067E-05	0,004136	1360,799
0,019696	0,009287	0,000685	8,20691E-06	0,00181	1420,569
0,018371	0,006587	0,00052	6,22938E-06	0,001304	1559,276
0,018064	0,002817	0,000228	2,73702E-06	0,000349	1627,617
0,017105	0,001521	0,000125	1,50297E-06	0,000342	1877,356

0,016874	0,000813	6,7E-05	8,02748E-07	6,64E-05	1882,679
0,016784	0,000431	3,55E-05	4,26125E-07	1,32E-05	1980,953

3. Tabel Data Hasil Perhitungan Susunan 1 (Temperatur 339 K)

$Y_{H_2O \text{ coal}}$	h_m	n''_A	n_A	Δm_{H_2O}	time
0,22	0,606068	0,005993	7,18421E-05	0,048344	672,9182
0,055966	0,257186	0,005278	6,32701E-05	0,031831	653,0988
0,040524	0,113004	0,004163	4,99074E-05	0,020818	717,1224
0,02439	0,05363	0,003343	4,00789E-05	0,010368	708,6943
0,024144	0,011426	0,001158	1,38854E-05	0,003204	830,7589
0,018998	0,007913	0,000907	1,08683E-05	0,001772	838,0669
0,018034	0,004273	0,000552	6,61717E-06	0,00097	896,5431
0,017318	0,002766	0,000385	4,6117E-06	0,000338	898,398
0,016866	0,000679	0,000102	1,2182E-06	6,54E-05	953,6612
0,016642	0,00029	4,36E-05	5,22336E-07	6,43E-05	1098,139

LAMPIRAN 3

Tabel Karakteristik Batubara (Low Rank Coal) berdasarkan Wilayahnya

Region	Calorific value (MJ/kg)	Moisture, %	Fixed Carbon, %	Volatile matter, %	Sulfur, % daf	Ash, % db
Australia ^[8]	5-14	44-71	65-70	25-30	0.1-5	0.5-13
Bulgaria ^[9]	5-14	14-62			3-11	28-58
China ^[10]		14		46		8
Czech Republic ^[9]	9-19	6-55			0.7-9	7-44
Germany ^[9]	7-12	12-51	17-20	52-62	0.4-4	5-11
Hungary ^[9]	6-15	19-48			0.8-5	18-40
Indonesia ^[11,12]	21-23	15-22	37-40	37-41	0.5-4	2-8
Poland ^[9]	7-22	9-55			0.5-7	8-40
Spain ^[9]	12-17	13-24			3-12	14-70
Turkey ^[13]	20-28	6-20	29-46	45-56	1.8-14	3-20
USA ^[14-17]						
Montana	24-25	37	31	25	0.48	7
North Dakota	16	34-44	25-33	24-30	0.2-1.4	4-8
Texas	15	32	26	28	0.7	14
Wyoming	17-22	21-37	30-41	27-36	0.2-1.2	4-12

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Datin. *Proses UBC skala laboratorium di Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara*, 2002. Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara. Jakarta.Indonesia.
- [2] Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara. 2011. Jakarta, Indonesia.
- [3] Batty. J. Clair and Steven L. Folkman. 1983. *Food Engineering Fundamentals*. John Wiley & Sons, New York.
- [4] Incropera, Frank P., De Witt, David P. 2002. *Fundamental of Heat and Mass Transfer 5th Edition*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- [5] Levy, Edward K., Nenad Sarunac, Harun Bilirgen and Hugo Caram. 2006. "Use of Coal Drying to reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants". Energy Research Center. Lehigh University. Bethlehem. Israel.
- [6] Moran, Michael J., Howard N. Shapiro. 2004. *Termodinamika Teknik II*. Edisi keempat. Diterjemahkan oleh Yulianto S. Nugroho dan Adi Sujosatyo. Jakarta : Erlangga.
- [7] Putro, Sarjono Asminto. *Simulasi Numerik dan Analisa Performansi di Ruang Pengering Dengan Variasi Kecepatan Udara Dan Porositas*. 2007. ITS Surabaya, Indonesia.
- [8] Munir, Misbakul. 2008. "*Studi Numerik Karakteristik Pengeringan Vakum dengan Variasi Tekanan Operasi, Temperatur Heater dan Metode Pemberian Panas*". Jurusan Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. Indonesia
- [9] Stoecker, Wilbert F., Jones, Jerold W. 1982. *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Edisi Kedua.

**Diterjemahkan oleh Supratman Hara. Jakarta:
Erlangga**

- [10] Yilmazoglu, M. Zeki, Ehsan Amirabedin. 2011. *3E Analysis of a Solar Assisted Rotary Type Coal Dryer*. International Journal of Renewable Energy Research. Vol. 2, No. 1, 2012. Department of Mechanical Engineering, Gazi University. Ankara. Turkey
- [11] Badan Pusat Statistik. 2010. Jakarta, Indonesia.
- [12] Deguchi, *Upgraded Brown Coal (UBC) sebagai teknologi peningkatan kualitas batubara peringkat rendah*. 1999. Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara. 2005. Jakarta.Indonesia
- .

RIWAYAT PENULIS



Ayu Sarah Novrizqa lahir di Surabaya pada 13 November 1990 merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Riwayat pendidikan penulis diawali dari SDN PacarKeling V Surabaya. Penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Surabaya pada tahun 2002-2005, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 1 Surabaya pada tahun 2005-2008. Ketertarikan penulis pada dunia keteknikan mendorong penulis untuk berkuliah di Institut

Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan mengambil Jurusan Teknik Mesin melalui jalur PMDK Reguler khusus wanita dan memperoleh NRP 2108100076.

Menjadi mahasiswa adalah anugerah bagi penulis, sehingga penulis senantiasa aktif dalam kegiatan akademik dan kemahasiswaan. Penulis aktif mengikuti kegiatan Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, menjabat sebagai Asisten Praktikum dan menjadi Asisten Dosen pada beberapa mata kuliah di kampus Teknik Mesin.

Penulis bertekad akan mengabdikan gelar sarjana jebolan ITS untuk senantiasa berbuat yang terbaik untuk Allah SWT serta Bangsa Indonesia.