

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PENGERINGAN
BATUBARA PADA *FLUIDIZED BED COAL DRYER* SECARA
3D TERHADAP PENGARUH KONFIGURASI *PERFORATED
PLATE* DAN VARIASI TEMPERATUR *INLET* DENGAN
ANSYS FLUENT 19.2**

HERLIYANA MEI RINI
NRP 0211184000028

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.
NIP 196505051990031005

Program Studi Sarjana Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PENGERINGAN
BATUBARA PADA *FLUIDIZED BED COAL DRYER* SECARA
3D TERHADAP PENGARUH KONFIGURASI *PERFORATED
PLATE* DAN VARIASI TEMPERATUR *INLET* DENGAN
ANSYS FLUENT 19.2**

HERLIYANA MEI RINI
NRP 0211184000028

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.
NIP 196505051990031005

Program Studi Sarjana Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



FINAL PROJECT - TM184835

**NUMERICAL STUDY OF COAL DRYING CHARACTERISTICS
IN 3D FLUIDIZED BED COAL DRYER ON THE EFFECT OF
PERFORATED PLATE CONFIGURATION AND INLET
TEMPERATURE VARIATION WITH ANSYS FLUENT 19.2**

HERLIYANA MEI RINI
NRP 0211184000028

Advisor
Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.
NIP 196505051990031005

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA PADA *FLUIDIZED BED COAL DRYER* SECARA 3D TERHADAP PENGARUH KONFIGURASI *PERFORATED PLATE* DAN VARIASI TEMPERATUR INLET DENGAN ANSYS FLUENT 19.2

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **HERLIYANA MEI RINI**
NRP. 0211184000028

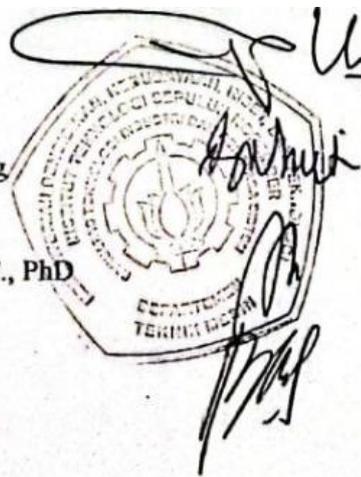
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsan M.Eng

3. Ary Bachtiar Krishna Putra ST., MT., PhD

4. Dr. Bambang Sudarmanta ST., MT.



Pembimbing

Penguji 1

Penguji 2

Penguji 3

SURABAYA
Juli, 2022

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

APPROVAL SHEET

NUMERICAL STUDY OF COAL DRYING CHARACTERISTICS IN 3D FLUIDIZED BED COAL DRYER ON THE EFFECT OF PERFORATED PLATE CONFIGURATION AND INLET TEMPERATURE VARIATION WITH ANSYS FLUENT 19.2

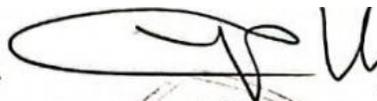
FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **HERLIYANA MEI RINI**
NRP. 0211184000028

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

 Advisor

2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani M.Eng

 Examiner 1

3. Ary Bachtiar Krishna Putra ST., MT., PhD

 Examiner 2

4. Dr. Bambang Sudarmanta ST., MT.

 Examiner 3

SURABAYA
July, 2022

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Herliyana Mei Rini / 0211184000028

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng / 196505051990031005

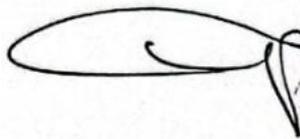
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Karakteristik Pengeringan Batubara pada *Fluidized Bed Coal Dryer* secara 3d terhadap Pengaruh Konfigurasi *Perforated Plate* dan Variasi Temperatur *Inlet* dengan Ansys *Fluent 19.2*” adalah hasil saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng)
NIP. 196505051990031005

Mahasiswa,



(Herliyana Mei Rini)

NRP. 0211184000028

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Herliyana Mei Rini / 0211184000028
Department : Teknik Mesin
Advisor / NIP : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng / 196505051990031005

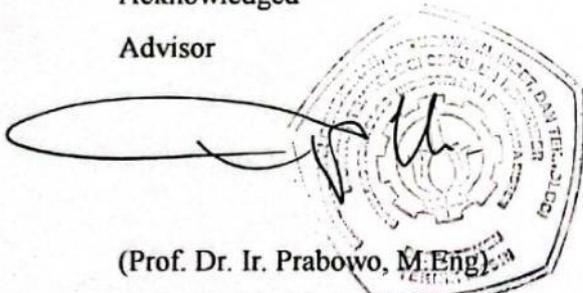
Hereby declare that the Final Project with the title of “Numerical Study of Coal Drying Characteristics in 3d Fluidized Bed Coal Dryer on the Effect of Perforated Plate Configuration and Inlet Temperature Variation with Ansys Fluent 19.2” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged

Advisor



(Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng)

NIP. 196505051990031005

Student,



(Herliyana Mei Rini)

NRP. 0211184000028

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA PADA
FLUIDIZED BED COAL DRYER SECARA 3D TERHADAP PENGARUH
KONFIGURASI PERFORATED PLATE DAN VARIASI TEMPERATUR INLET
DENGAN ANSYS FLUENT 19.2**

Nama Mahasiswa / NRP : Herliyana Mei Rini / 0211184000028
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

Abstrak

Boiler pada suatu PLTU Batubara umumnya didesain dengan spesifikasi tertentu yaitu menggunakan batubara berjenis *high rank* dalam pengoperasiannya. Namun, pada kondisi aktualnya ketersediaan batubara berjenis *high rank* ini sangatlah terbatas, dan apabila ada harganya sangat mahal sehingga dinilai tidak ekonomis. Cadangan batubara yang melimpah di Indonesia saat ini didominasi oleh batubara berjenis *medium* hingga *low rank coal*. Perubahan penggunaan batubara *high rank coal* menjadi *low rank coal* pada boiler PLTU akan berdampak pada tidak adanya *pulverizer* yang *standby*. Hal ini dikarenakan untuk mendapatkan daya bangkitan yang sama maka dibutuhkan massa alir batubara yang besar, sehingga seluruh *pulverizer* harus bekerja secara ekstra untuk memenuhi kapasitas yang dibutuhkan boiler. Apabila terdapat kerusakan pada salah satu *pulverizer*, maka menyebabkan *reability* suatu pembangkit akan menurun. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode untuk meningkatkan kualitas batubara. Salah satu metode yang dapat dilakukan yaitu melalui proses pengeringan batubara menggunakan teknologi *fluidized bed coal dryer* yang dapat menurunkan *moisture content* dari batubara, sehingga dapat menaikkan nilai kalor pada batubara. Dengan melakukan metode pengeringan batubara tersebut, diharapkan dapat meningkatkan *reability* dari PLTU Batubara.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6 untuk pemodelan geometri dan *meshing*, serta *software* ANSYS FLUENT 19.2 untuk melakukan proses simulasi perpindahan panas dan massa pada batubara. Penelitian ini mensimulasikan *fluidized bed dryer* sebagai pengering batubara dengan media pengering berupa udara. Terdapat 2 jenis *perforated plate* yang akan dibandingkan, yaitu susunan *aligned* dan *staggered*. Adapun variasi temperatur udara pengering pada sisi *inlet* yaitu sebesar 45°C, 55°C, dan 65°C dengan kecepatan udara pengering konstan sebesar 2,4 m/s. Pada penelitian ini akan diperoleh beberapa data properties hasil simulasi yang kemudian akan diolah melalui perhitungan manual dan didapatkan juga hasil kualitatif berupa kontur.

Hasil penelitian yang diperoleh adalah terjadi penurunan *moisture content* pada batubara. Penurunan nilai *moisture content* paling rendah dicapai oleh temperatur 65°C sebesar 27,75% pada konfigurasi *perforated plate aligned* dan 27,97% pada *staggered*. Selanjutnya, penurunan paling rendah kedua oleh temperatur 55°C dengan nilai *moisture content* sebesar 29,95% pada *perforated plate aligned* dan 30,10% pada *staggered*. Penurunan nilai *moisture content* paling rendah ketiga dicapai oleh temperatur 45°C sebesar 32,02% pada konfigurasi *perforated plate aligned* dan 32,17% pada *staggered*. Didapatkan bahwa semakin tinggi temperatur *inlet* maka penurunan nilai *moisture content* semakin besar serta laju pengeringan batubara semakin meningkat. Konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* tidak memiliki pengaruh terhadap proses pengeringan batubara, dikarenakan tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai *moisture content* kedua konfigurasi tersebut. Proses yang terjadi pada udara pengering di dalam *psychrometric chart* adalah *cooling* dan *humidifying*

yaitu terjadi penurunan temperatur dan peningkatan kandungan air pada udara pengering dari sisi *inlet* ke *outlet*, diakibatkan udara pengering melewati batubara.

Kata kunci: batubara, *fluidized bed coal dryer*, temperatur, *perforated plate*, *moisture content*

**NUMERICAL STUDY OF COAL DRYING CHARACTERISTICS IN 3D FLUIDIZED
BED COAL DRYER ON THE EFFECT OF PERFORATED PLATE CONFIGURATION
AND INLET TEMPERATURE VARIATION WITH ANSYS FLUENT 19.2**

Student Name / NRP : Herliyana Mei Rini / 0211184000028
Department : Teknik Mesin FTIRS – ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

Abstract

Boilers in a coal-fired power plant are generally designed with certain specifications, using high rank coal in their operation. But in actual conditions, the availability of high rank coal is limited and the price is very expensive, so it is considered uneconomical. The abundant coal reserves in Indonesia are currently dominated by medium until low rank. The changes in the use of high rank coal to low rank coal in PLTU boiler will have an impact on the absence of a standby pulverizer. This is because to get the same power generation, need a large mass flow of coal, so it make all pulverizers must work extra to get the required capacity of the boiler. If there is damage to one of the pulverizers, it causes the reliability of PLTU decrease. Therefore, we need a method to improve the quality of coal. Therefore, we need a method to improve the quality of coal. One of the methods is by coal drying process using fluidized bed coal dryer technology which can reduce the moisture content of the coal, so increasing the calorific value of the coal. By using this method, it is expected to increase the reliability of the coal-fired power plant.

This research was conducted using GAMBIT 2.4.6 software for geometry and meshing modeling, then using ANSYS FLUENT 19.2 software for simulating heat and mass transfer in coal. This research simulates a fluidized bed dryer as a coal dryer with air as a drying medium. There are 2 types of perforated plates to be compared, namely aligned and staggered arrangements. The drying air temperature variations on the inlet side are 45°C, 55°C, and 65°C with a constant drying air velocity is 2,4 m/s. In this research, some data properties of the simulation results will be processed through manual calculations and qualitative results is in the form of contours.

The results of this research are the moisture content of coal is decrease. The lowest decrease in moisture content was achieved by temperature 65°C at 27.75% in the perforated plate aligned configuration and 27.97% at the staggered. Then, the second lowest decrease by temperature 55°C with a moisture content value of 29.95% on perforated plate aligned and 30.10% on staggered. The third lowest decrease in moisture content was achieved by temperature 45°C at 32.02% in the perforated plate aligned configuration and 32.17% at the staggered. The conclusion is the higher inlet temperature, the greater decrease of moisture content at the same time and the drying rate increased. The aligned and staggered perforated plate configurations have no influence on the coal drying process, because there is no significant difference in the value of the moisture content of the two configurations. The processes that occur in the drying air in the psychrometric chart are cooling and humidification, where there is a decrease in temperature and an increase in the water content of the drying air from the inlet to the outlet, due to the drying air passing through the coal.

Keywords: coal, fluidized bed coal dryer, temperature, perforated plate, moisture content

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,
Puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Numerik Karakteristik Pengeringan Batubara Pada *Fluidized Bed Coal Dryer* Secara 3d terhadap Pengaruh Konfigurasi *Perforated Plate* Dan Variasi Temperatur *Inlet* dengan Ansys Fluent 19.2”. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini, izinkan penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun materiil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain :

1. Kedua orang tua yaitu Papa Haryono dan Mama Lasmini, serta kedua saudara Mas Bagus dan Mbak Yunita yang selalu memberikan dukungan doa, kasih sayang, dan motivasi terus menerus sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan pengetahuan dan masukan selama bimbingan kepada penulis.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani M.Eng, Bapak Ary Bachtiar Krishna Putra ST., MT., PhD, dan Bapak Dr. Bambang Sudarmanta ST., MT. selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan masukan dan saran kepada penulis dalam tugas akhir ini.
4. Bapak Wawan Aries Widodo, ST. Dr. Dr., selaku dosen wali penulis yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama penulis menjalani perkuliahan.
5. M. Tareqh Al-Faqih Nasution sebagai tempat penulis mencurahkan pemikiran, tempat berbagi opini, ada dalam suka maupun duka sehingga seluruh waktu dan perhatian yang telah diberikan dapat memotivasi penulis dalam menjalani kegiatan perkuliahan dan menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Seluruh teman satu bimbingan (Ani, Donat, Feby, Sutan, Kepnop) yang sudah berjuang bersama.
7. Seluruh pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin ITS 2020/2021 khususnya Departemen Kewirausahaan.
8. Seluruh teman-teman angkatan M61 yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
APPROVAL SHEET.....	ix
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	xi
STATEMENT OF ORIGINALITY	xiii
Abstrak.....	xv
Abstract.....	xvii
KATA PENGANTAR.....	xix
DAFTAR ISI	xxi
DAFTAR GAMBAR.....	xxv
DAFTAR TABEL	xxix
DAFTAR SIMBOL	xxxii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu.....	5
2.1.1 Edward K. Levy (2006).....	5
2.1.2 Wei Cheng Wang (2012).....	7
2.1.3 Nuha Sofianita (2021)	11
2.1.4 Ajie Satriya Pratama (2020).....	13
2.1.5 Jibin Antony dan M.B Shyamkumar (2016).....	15
2.2 Dasar Teori.....	16
2.2.1 Batubara.....	16
2.2.2 Mekanisme Pengeringan.....	18
2.2.3 <i>Fluidized Bed Coal Dryer</i>	20
2.2.4 Prinsip Perpindahan Massa pada Batubara.....	22
2.2.5 Analisa Perpindahan Panas dan Massa.....	23
2.2.6 Prinsip <i>Psychrometric Chart</i> pada Udara Pengeringan.....	24
BAB III METODOLOGI	30
3.1 Metode Penelitian	30

3.1.1	Studi Literatur	30
3.1.2	Pemodelan dan Simulasi	30
3.1.3	Penngolahan dan Analisis Data Hasil Simulasi	30
3.1.4	Penulisan Laporan.....	30
3.2	Pemodelan Geometri dan Simulasi pada GAMBIT 2.4.6 dan ANSYS FLUENT 19.2 30	
3.2.1	Tahap Pre-Processing.....	31
3.2.2	Tahap <i>Processing</i>	36
3.2.3	Tahap <i>Post-Processing</i>	42
3.3	Kerangka Penelitian.....	43
3.4	<i>Flowchart</i> Penelitian.....	44
3.4.1	<i>Flowchart</i> Metode Penelitian.....	44
3.4.2	<i>Flowchart</i> Perhitungan.....	45
3.5	<i>Timeline</i> Penelitian	46
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		48
4.1	Data Penelitian.....	48
4.2	Contoh Perhitungan	48
4.2.1	Perhitungan Densitas H ₂ O pada Permukaan Batubara.....	48
4.2.2	Perhitungan Densitas H ₂ O pada Udara <i>Inlet</i>	49
4.2.3	Perhitungan Setelah <i>Running Fluent</i>	49
4.2.4	<i>Boundary Condition</i> untuk <i>Running</i> Selanjutnya.....	50
4.2.5	Perhitungan Validasi	50
4.3	Analisa Kontur.....	52
4.3.1	Analisa Kontur Fraksi Massa H ₂ O.....	52
4.3.2	Analisa Kontur Temperatur.....	58
4.4	Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H ₂ O	64
4.4.1	Distribusi Temperatur	64
4.4.2	Distribusi Fraksi Massa H ₂ O.....	67
4.4.3	Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H ₂ O dengan Variasi Konfigurasi <i>Perforated Plate</i>	70
4.5	Analisa Perubahan <i>Moisture Content</i> Terhadap Waktu	72
4.5.1	Analisa Perubahan <i>Moisture Content</i> Terhadap Waktu Pada Variasi Temperatur Udara Pengering	72
4.5.2	Analisa Perubahan <i>Moisture Content</i> Terhadap Waktu Pada Variasi Konfigurasi <i>Perforated Plate</i>	74

4.5.3	Analisa Perubahan <i>Moisture Content</i> terhadap Sumbu Y.....	76
4.6	Analisa Laju Perpindahan Panas dan Massa terhadap Sumbu Y.....	79
4.6.1	Analisa Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y	79
4.6.2	Analisa Laju Perpindahan Massa terhadap Sumbu Y	80
4.7	Analisa Distribusi Temperatur Batubara terhadap Sumbu Y.....	82
4.8	Analisa <i>Psychrometric Chart</i>	83
4.8.1	Analisa Karakteristik Udara Pengering pada <i>Psychrometric Chart</i> dengan Variasi 84 Temperatur	84
4.8.2	Analisa Karakteristik Udara Pengering pada <i>Psychrometric Chart</i> dengan Variasi Konfigurasi <i>Perforated Plate</i>	87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		90
5.1	Kesimpulan	90
5.2	Saran	90
DAFTAR PUSTAKA.....		91
LAMPIRAN 1		93
LAMPIRAN 2		94
BIODATA PENULIS		108

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Alat Eksperimen Pengujian Edward K. Levy 2006.....	5
Gambar 2.2 Grafik Pengaruh Kecepatan Udara Pengering Terhadap Drying rate Penelitian Edward K. Levy 2006	6
Gambar 2.3 Grafik Pengaruh Temperatur Udara Pengering Terhadap Drying rate Penelitian Edward K. Levy 2006.....	6
Gambar 2.4 Pengaruh Laju pengeringan Batubara Terhadap Penghematan	7
Gambar 2.5 Skema Alat Eksperimen Pengujian Wei Cheng Wang 2012.....	8
Gambar 2. 6 Grafik Moisture content vs time (a) Buckheart, (b) Crown Mine, (c) Viper Mine.....	9
Gambar 2.7 Grafik Relative Humidity vs Moisture content (a) Buckheart, (b) Crown Mine, (c) Viper Mine	10
Gambar 2.8 Geometri 2D susunan batubara pada drying chamber	11
Gambar 2.9 Perubahan moisture content dengan variasi kecepatan pada temperatur (a) 1,6 m/s, (b) 2,4 m/s, dan (c) 2,4 m/s.....	12
Gambar 2.10 Kontur fraksi massa H ₂ O pada kecepatan 1,6 m/s dengan variasi temperatur (a) 45 °C, (b) 55 °C, dan (c) 65 °C	12
Gambar 2.11 Grafik Simulasi Moisture Content Barubara dengan Variasi Tipe Perforated Plate Fungsi Waktu pada Temperatur Udara Pengering 40°C dan 50 C	13
Gambar 2.12 Psychrometric Chart Udara Keluar pada Perforated Plate Tipe B dengan Temperatur Udara Pengering Masuk 40°C, 46°C dan 50°C	14
Gambar 2.13 Psychrometric Chart Udara Keluar pada Perforated Plate Tipe A dengan Temperatur Udara Pengering Masuk 40°C, 46°C dan 50°C	14
Gambar 2.14 Grafik Temperatur Pasir vs Time dengan Variasi Temperatur Inlet	15
Gambar 2.15 Geometri 3D Fluidized Bed Dryer	15
Gambar 2.16 Klasifikasi Jenis Batubara	17
Gambar 2.17 Klasifikasi Kandungan Air pada Batubara	18
Gambar 2.18 Periode Proses Pengeringan.....	19
Gambar 2.19 Fluidized Bed Coal Dryer	20
Gambar 2.20 <i>Perforated plate Berdasarkan Ukuran Diameter</i>	21
Gambar 2.21 <i>Perforated plate Berdasarkan Konfigurasi Susunan (a) Aligned, (b) Staggered</i>	21
Gambar 2.22 Properti Psychrometric Chart.....	24
Gambar 2. 24 Ilustrasi Proses Pemanasan dan Humidifikasi.....	26
Gambar 2.25 Proses Pemanasan dan Humidifikasi pada Psychrometric Chart	27
Gambar 3.1 Geometri Fluidized bed coal dryer.....	31
Gambar 3.2 Hasil Pemodelan Geometri Secara Keseluruhan Fluidized bed coal dryer pada GAMBIT 2.4.6 (a) Perforated plate Aligned (b) Perforated plate Staggered.....	32
Gambar 3.3 Perbedaan Bentuk Konfigurasi Perforated Plate Fluidized Bed Coal Dryer (a) Aligned (b) Staggered.....	33
Gambar 3.4 Hasil Meshing Fluidized bed coal dryer Konfigurasi Aligned Perforated plate (A) Tampak Atas (B) Tampak Isometric (C) Tampak Samping (D) Tampak Depan (E)Tampak Bawah ..	34
Gambar 3.5 Hasil Meshing Fluidized bed coal dryer Konfigurasi Staggered Perforated plate (A) Tampak Atas (B) Tampak Isometric (C) Tampak Samping (D) Tampak Depan (E)Tampak Bawah ..	35
Gambar 3.6 Boundary Conditions	36
Gambar 3.7 Penentuan Inlet Fraksi Massa H ₂ O	39
Gambar 3.8 (a) Dimensi Konfigurasi Perforated Plate Aligned (b) Dimensi Konfigurasi Perforated Plate Staggered	40
Gambar 3.9 Kerangka Penelitian.....	43
Gambar 3.10 Flowchart Metode Penelitian	44
Gambar 3. 11 Flowchart Perhitungan	45

Gambar 4.1 Posisi Pengambilan Bidang Kontur Temperatur dan Fraksi Massa H ₂ O.....	52
Gambar 4.2 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang XY Konfigurasi Perforated Plate Aligned dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	52
Gambar 4.3 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang YZ Konfigurasi Perforated Plate Aligned dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	53
Gambar 4.4 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang XZ Konfigurasi Perforated Plate Aligned dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	54
Gambar 4.5 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang XY pada Konfigurasi Perforated Plate Staggered dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	54
Gambar 4.6 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang YZ pada Konfigurasi Perforated Plate Staggered dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	55
Gambar 4.7 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang XZ pada Konfigurasi Perforated Plate Staggered dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	56
Gambar 4.8 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang XY pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered.....	56
Gambar 4.9 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang YZ pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered.....	57
Gambar 4.10 Kontur Fraksi Massa H ₂ O Bidang XZ pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered.....	58
Gambar 4.11 Kontur Temperatur Bidang XY pada Konfigurasi Perforated Plate Aligned dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	58
Gambar 4.12 Kontur Temperatur Bidang YZ pada Konfigurasi Perforated Plate Aligned dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	59
Gambar 4.13 Kontur Temperatur Bidang XZ pada Konfigurasi Perforated Plate Aligned dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	59
Gambar 4.14 Kontur Temperatur Bidang XY pada Konfigurasi Perforated Plate Staggered dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	60
Gambar 4.15 Kontur Temperatur Bidang YZ pada Konfigurasi Perforated Plate Staggered dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	61
Gambar 4.16 Kontur Temperatur Bidang XZ pada Konfigurasi Perforated Plate Staggered dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	61
Gambar 4.17 Kontur Temperatur Bidang XY pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered.....	62
Gambar 4.18 Kontur Temperatur Bidang YZ pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered.....	63
Gambar 4.19 Kontur Temperatur Bidang XZ pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered.....	63
Gambar 4.20 Posisi Pengambilan Titik Distribusi Temperatur Pada Plane XY, YZ, dan XZ.....	64
Gambar 4.21 Grafik Distribusi Temperatur pada Konfigurasi Aligned Perforated Plate (a) Plane XY, (b) Plane YZ, (c) Plane XZ.....	65
Gambar 4.22 Grafik Distribusi Temperatur pada Konfigurasi Staggered Perforated Plate (a) Plane XY, (b) Plane YZ, (c) Plane XZ.....	66
Gambar 4.23 Posisi Pengambilan Titik Distribusi Fraksi Massa H ₂ O Pada Plane XY, YZ, dan XZ ..	67
Gambar 4.24 Grafik Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada Konfigurasi Staggered Perforated Plate (a) Plane XY, (b) Plane YZ, (c) Plane XZ.....	68
Gambar 4.25 Grafik Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada Konfigurasi Staggered Perforated Plate (a) Plane XY, (b) Plane YZ, (c) Plane XZ.....	69

Gambar 4.26 Grafik Distribusi Temperatur pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered (a) Plane XY, (b) Plane YZ, (c) Plane XZ.....	70
Gambar 4.27 Grafik Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered (a) Plane XY, (b) Plane YZ, (c) Plane XZ	71
Gambar 4.29 Grafik Perubahan Moisture Content Terhadap Waktu pada Konfigurasi Staggered Perforated Plate.....	72
Gambar 4.28 Grafik Perubahan Moisture Content Terhadap Waktu pada Konfigurasi Aligned Perforated Plate.....	72
Gambar 4.30 Grafik Perubahan Moisture Content Terhadap Waktu pada Konfigurasi Perforated Plate Aligned dan Staggered.....	74
Gambar 4.31 Grafik Perubahan Moisture Content Terhadap Waktu pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate pada Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C	75
Gambar 4.32 Posisi Plane Batubara pada Sumbu Y.....	76
Gambar 4.33 Grafik Moisture Content Terhadap Sumbu Y pada Aligned Perforated Plate saat menit ke-1 pada Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	77
Gambar 4.34 Grafik Moisture Content Terhadap Sumbu Y pada Staggered Perforated Plate saat Menit ke-1 pada Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C.....	78
Gambar 4.35 Grafik Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada konfigurasi perforated plate (a) Aligned (b) Staggered.....	79
Gambar 4.36 Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada Konfigurasi Perforated Plate	80
Gambar 4.37 Grafik Laju Perpindahan Massa terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada konfigurasi perforated plate (a) Aligned (b) Staggered.....	80
Gambar 4.38 Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada Konfigurasi Perforated Plate	81
Gambar 4.39 Distribusi Temperatur Batubara terhadap Sumbu Y setelah Menit ke-1 pada konfigurasi (a) perforated plate aligned (b) perforated plate staggered	82
Gambar 4.40 Perbandingan Distribusi Temperatur Batubara terhadap Sumbu Y setelah Menit ke-1 Pengeringan pada Konfigurasi Perforated Plate	82
Gambar 4.41 Posisi Plane Pengambilan Data Input Psychrometric Chart	83
Gambar 4.43 Karakteristik Udara Pengering pada Psychrometric Chart untuk Konfigurasi Staggered Perforated Plate.....	84
Gambar 4.42 Karakteristik Udara Pengering pada Psychrometric Chart untuk Konfigurasi Aligned Perforated Plate.....	84
Gambar 4.44 Karakteristik Udara Pengering pada Psychrometric Chart	87
Gambar 4.45 Karakteristik Udara Pengering dalam Psychrometric Chart pada Variasi Konfigurasi Perforated Plate di Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C	87

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kapasitas Terpasang Pembangkit di Indonesia	1
Tabel 1.2 Data Cadangan Batubara di Indonesia	1
Tabel 2.1 Komposisi dan Parameter Fisik Batubara.....	17
Tabel 3.1 Geometri Fluidized bed coal dryer.....	31
Tabel 3.2 Solver FLUENT 19.2	36
Tabel 3.3 Model FLUENT 19.2	37
Tabel 3.4 Boundary Conditions FLUENT 19.2	37
Tabel 3.5 Solution Methods FLUENT 19.2	42
Tabel 3.6 Timeline Penelitian	46
Tabel 4.1 Validasi Berdasarkan <i>Psychrometric Chart</i> dan Perhitungan.....	51
Tabel 1 Certificate of Sampling and Analysis Batubara.....	93
Tabel 2 Data Hasil Simulasi Fluent	94
Tabel 3 Data Hasil Perhitungan	97
Tabel 4 Data Nilai Distribusi Temperatur.....	101
Tabel 5 Data Distribusi Fraksi Massa H ₂ O.....	103
Tabel 6 Data Nilai Laju Perpindahan Panas Batubara pada Sumbu Y	105
Tabel 7 Data Psychrometric Chart.....	106

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR SIMBOL

A	= Luas area	m ²
Ar	= <i>Archimedes number</i>	
c _p	= <i>Specific heat</i>	J/kg.K
d	= diameter	m
D _{AB}	= <i>Binary mass diffusivity</i>	m ² /s
g	= Percepatan gravitasi	m/s ²
h	= <i>Convection heat transfer coefficient</i>	W/m ² .K
h _m	= <i>Convection mass transfer coefficient</i>	m/s
k	= Konduktivitas termal	W/m.K
L	= Panjang	m
Le	= <i>Lewis number</i>	
m	= Massa	kg
MC	= <i>Moisture content</i>	
n''	= <i>Mass flux uap air</i>	kg/m ² .s
Nu	= <i>Nusselt number</i>	
P	= Tekanan	Pa
Pr	= <i>Prandtl number</i>	
R	= <i>Universal gas constant</i>	J/kg.K
Ra	= Tetapan gas udara kering	J/kg.K
Rs	= Tetapan gas uap air	J/kg.K
Re	= <i>Reynold number</i>	
Sc	= <i>Schmidt number</i>	
Sh	= <i>Sherwood number</i>	
T	= Suhu	K
t	= Waktu	s
u	= Kecepatan udara	m/s
<i>Greek Symbols</i>		
α	= Difusivitas termal	m ² /s
Δ	= Perubahan	
μ	= Viskositas dinamik	kg/m.s
ν	= Viskositas kinematic	m ² /s
ρ	= Massa jenis	kg/m ³
Ø	= <i>Relative humidity</i>	%
ω	= <i>Humidity ratio</i>	
<i>Subscripts</i>		
g	= Gas	
H ₂ O	= Air	
mf	= Fluidisasi minimum	
p	= Partikel	
s	= Permukaan	
t	= terminal	
w	= parsial uap air	
ws	= jenuh uap air	
x	= arah x, <i>general species</i>	
∞	= <i>Ambien</i>	

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini jumlah penduduk negara Indonesia terus mengalami peningkatan. Bahkan berdasarkan sumber data dari *World Health Organization* (WHO), negara Indonesia menempati urutan keempat populasi penduduk terbesar di dunia setelah China, India, dan Amerika Serikat. Dampak dari peningkatan populasi penduduk ini, mengakibatkan jumlah konsumsi energi juga naik terutama energi listrik. Energi listrik merupakan energi yang dominan dibutuhkan untuk kehidupan manusia. Salah satu sumber penghasil listrik yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), dimana bahan bakar dari PLTU ini yaitu batubara. Tabel 1.1 menunjukkan berbagai jenis pembangkit listrik di Indonesia dengan kapasitas pembangkitannya.

Tabel 1.1 Kapasitas Terpasang Pembangkit di Indonesia

Jenis Pembangkit Listrik	Kapasitas Terpasang PLN menurut Jenis Pembangkit Listrik (MW)		
	2018	2019	2020
Tenaga Air	5 436	5 447	5 513
Tenaga Uap	32 026	33 095	32 920
Tenaga Gas	5 467	4 998	5 174
Tenaga Gas Uap	11 249	12 056	11 993
Tenaga Panas Bumi	1 986	1 986	1 979
Tenaga Diesel	6 384	5 009	5 388
Tenaga Mesin Gas	886	1 920	1 749
Tenaga Mikro Hidro	152	170	204
Tenaga Surya	14	18	18
Tenaga Lainnya	146	143	296
Total Kapasitas Terpasang	63 747	64 843	65 236

Sumber : (*Badan Pusat Statistik, 2020*)

Berdasarkan tabel 1.1 di atas, kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan kapasitas pembangkitan yang selalu meningkat setiap tahunnya. Dimulai dari tahun 2018 kapasitas pembangkitan PLTU sebesar 32.026 MW, lalu pada tahun 2019 sebesar 33.095 MW, dan pada tahun 2020 sebesar 32.920 MW. Seiring dengan peningkatan kapasitas pembangkitan pada PLTU, maka penggunaan batubara sebagai bahan bakar dalam dunia kelistrikan di Indonesia juga kian meningkat. Potensi batubara di Indonesia sangat melimpah, namun hampir seluruh kualitas batubara di Indonesia berada dalam kategori *low rank*. Tabel 1.2 menunjukkan data cadangan batubara di Indonesia.

Tabel 1.2 Data Cadangan Batubara di Indonesia

Kualitas	Cadangan (Juta Ton)		
	Terkira	Terbukti	Total
Kalori Rendah	7.242,44	6.140,09	13.387,53
Kalori Sedang	8.818,10	13.068,72	21.886,82
Kalori Tinggi	1.170,56	1.542,67	2.713,23
Kalori Sangat Tinggi	358,56	459,34	817,90

Sumber : (PT. PLN (PERSERO), 2021)

Pada tabel 1.2 di atas merupakan data cadangan batubara di Indonesia pada Rancangan Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN Persero Tahun 2021-2030. Batubara di Indonesia dikelompokkan ke dalam empat kualitas klasifikasi, diantaranya yaitu batubara kalori rendah dengan nilai kalor kurang dari 5.100 kal/gr, batubara kalori sedang dengan nilai kalor antara 5.100 – 6.100 kal/gr, batubara kalori tinggi dengan nilai kalor 6.100 – 7.100 kal/gr, dan batubara kalori sangat tinggi dengan nilai kalor lebih dari 7.100 kal/gr. Berdasarkan tabel 1.2 di atas menunjukkan bahwa batubara di Indonesia didominasi oleh batubara kalori sedang dan rendah, dengan jumlah cadangan batubara kalori sedang sebesar 21.886,82 juta ton, dan batubara kalori rendah sebesar 13.387,53 juta ton.

Karakteristik pembakaran batubara pada PLTU dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya yaitu kualitas batubara, batasan yang ditentukan oleh desain boiler, posisi burner, konfigurasi fisik dan perpindahan panas dalam boiler serta kondisi operasional. Suatu boiler pada PLTU Batubara pada umumnya didesain dengan spesifikasi tertentu yaitu menggunakan batubara kalori tinggi. Batubara kalori tinggi ini memiliki *high heating value* dan nilai *moisture content* sebesar 2-15%. Sebelum batubara memasuki boiler, batubara dihaluskan terlebih dahulu oleh *pulverizer* sampai dengan ukuran batubara yang telah sesuai dengan spesifikasi boiler. Dalam proses yang kontinyu ini, terdapat empat *pulverizer mill* yang beroperasi dan satu *standby*. Hal ini bertujuan agar dapat menggantikan fungsi *pulverizer mill* apabila ada yang mengalami kerusakan. Pada kondisi aktual, jumlah batubara kalori tinggi di Indonesia sangat terbatas, disamping itu harga batubara kalori tinggi sangatlah mahal sehingga dinilai tidak ekonomis. Oleh karena itu, PLTU Batubara beralih menggunakan batubara dengan kualitas kalori rendah dengan *low heating value* dan nilai *moisture content* sebesar 25-60%, yang mana jumlahnya sangat melimpah saat ini. Permasalahan akan timbul apabila PLTU Batubara yang didesain untuk menggunakan batubara kalori tinggi dipaksakan menggunakan batubara dengan kalori dibawah spesifikasi boiler yaitu kalori rendah. Dengan menggunakan batubara kalori rendah, untuk menghasilkan daya bangkitan yang sama maka dibutuhkan massa alir batubara yang lebih tinggi. Hal ini mengakibatkan seluruh *pulverizer mill* bekerja secara maksimal untuk memenuhi kapasitas yang dibutuhkan oleh boiler tersebut. Sehingga apabila terjadi kerusakan pada salah satu *pulverizer*, maka hal ini akan mengakibatkan *reability* suatu pembangkit menurun.

Fenomena penggunaan batubara kalori rendah dan sedang tersebut dapat diatasi dengan meningkatkan kualitas batubara kalori rendah dan sedang menjadi batubara kalori tinggi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi pengeringan batubara (*coal dryer*). Teknologi pengeringan dewasa ini semakin berkembang, beberapa metode pengeringan batubara yaitu *evaporating drying* dan *non evaporating drying*, diantaranya adalah *pneumatic dryer*, *rotary tube dryer*, *vibratory dryer*, *shaft dryer*, *mill type dryer*, dan *fluidized bed dryer*. Parameter yang digunakan untuk menentukan metode *coal dryer* yaitu *coal grain size*, *drying rate*, kapasitas batubara, kemampuan mereduksi *moisture content*, dan maksimum temperatur pada *air heater*. Diharapkan dengan menggunakan metode ini akan menurunkan nilai *moisture content* pada batubara, sehingga dapat menaikkan nilai kalor dari batubara. Dengan meningkatnya nilai kalor batubara, maka PLTU tidak perlu lagi untuk menjalankan seluruh *pulverizer*-nya, sehingga *reability* suatu pembangkit akan naik. Pada penelitian dalam penyusunan tugas akhir ini, digunakan jenis alat pengering *fluidized bed coal dryer*. Alat pengering ini menggunakan prinsip fluidisasi, yaitu mengalirkan udara panas sebagai udara pengering melalui *perforated plate* sehingga menyebabkan batubara akan terangkat atau terfluidisasi di dalam *drying chamber*. Teknologi *fluidized bed dryer* ini dipilih karena memiliki kemampuan pencampuran yang baik, menggunakan media pemanas dengan temperatur tinggi, serta mudah untuk dikontrol. Selain itu, salah satu ciri khas dari *fluidized bed dryer* ini yaitu memiliki porositas yang tinggi sekitar 0,4 – 0,5. Dimana nilai porositas ini bergantung pada kecepatan aliran *air heater*. Karena hal ini *fluidized bed dryer* dapat

mengeringkan batubara dengan ukuran mikrometer hingga puluhan milimeter karena memiliki desain yang sederhana dan memiliki kapasitas yang tinggi (Pikon, 2006).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu oleh Wei Cheng Wang pada tahun 2012 yaitu melakukan sebuah eksperimental pengeringan batubara dengan metode *fluidized bed dryer* dengan menggunakan tiga tipe jenis batubara. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa semakin tinggi temperatur udara pengering, maka semakin kecil nilai *moisture content*-nya, lalu didapatkan juga bahwa nilai *moisture content* sebanding dengan nilai *relative humidity*. Apabila *moisture content* batubara tinggi, maka nilai *relative humidity* pun ikut tinggi. Penelitian juga telah dilakukan oleh Levy dkk pada tahun 2006, merancang penelitian eksperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan bahwa kecepatan udara pengering pada sisi masuk *drying chamber* berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Pada penelitian ini kecepatan udara pengering pada sisi *inlet* akan meningkatkan laju pengeringan batubara apabila kecepatan ditingkatkan hingga nilai tertentu. Begitu juga dengan temperatur udara pengering, semakin tinggi temperatur udara pengering maka penurunan *moisture content* batubara juga semakin besar.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh bentuk konfigurasi *perforated plate* yang tersusun secara *staggered* dan *aligned* terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur udara pengering terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*?
3. Bagaimana karakteristik udara pengering dalam grafik *psychrometric chart*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Permodelan *fluidized bed coal dryer* dibuat dengan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6 dan disimulasikan dengan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2 dengan domain aliran tiga dimensi.
2. Permodelan batubara dan *drying chamber* berbentuk segiempat.
3. Kecepatan *inlet* konstan sebesar 2,4 m/s.
4. Temperatur *wall* konstan sebesar 27°C.
5. Proses perpindahan panas dan analisa laju pengeringan dalam kondisi *steady state*.
6. *Drying chamber* terinsulasi secara sempurna.
7. Fluida yang digunakan pada udara pengering dimodelkan sebagai gas ideal.
8. Proses pengeringan hanya terjadi pada permukaan batubara.
9. Massa batubara tetap sebesar 300 gram.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui pengaruh bentuk konfigurasi *perforated plate* yang tersusun secara *staggered* dan *aligned* terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*.
2. Mengetahui pengaruh variasi temperatur udara pengering terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*.
3. Mengetahui karakteristik udara pengering dalam grafik *psychrometric chart*.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

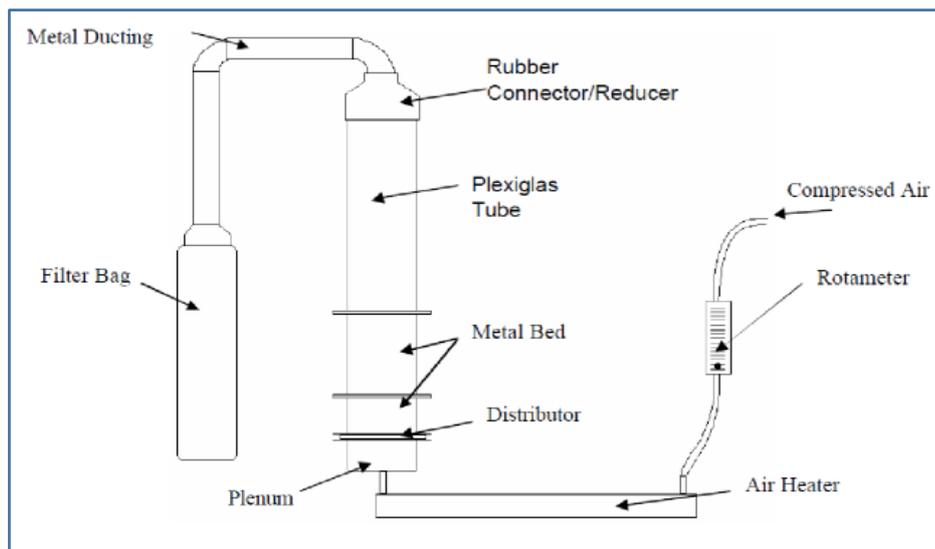
1. Bagi penulis sebagai sarana dalam penerapan keilmuan yang telah di dapatkan selama berkuliah di Departemen Teknik Mesin ITS.
2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan *fluidized bed coal dryer* dengan tipe *perforated plate* yang dapat dipergunakan untuk perkembangan dan penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

2.1.1 Edward K. Levy (2006)

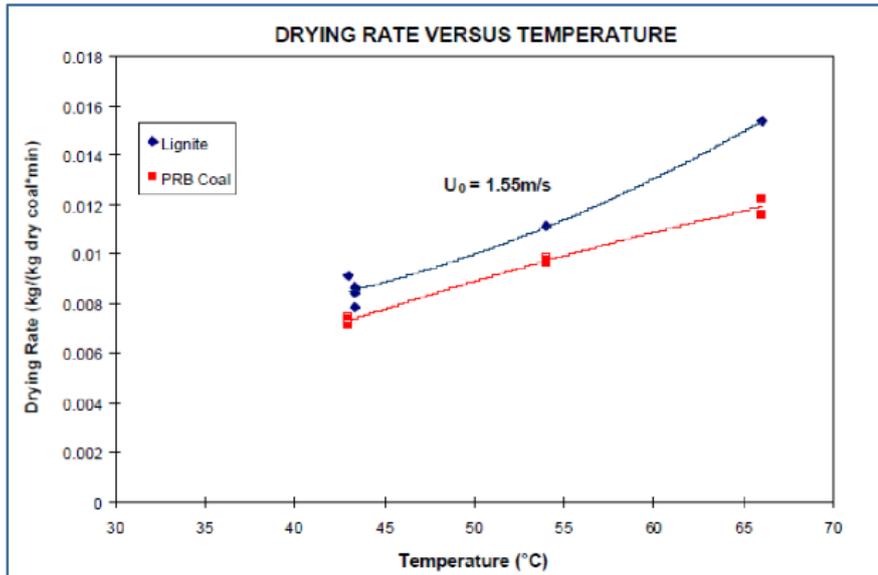
Penelitian tentang teknologi pengeringan batubara pernah dilakukan oleh **Edward K Levy dkk, 2006**. Dalam penelitiannya yang berjudul “*Use of Coal Drying To Reduce Waterconsumed In Pulverized Coal Power Plants*”, Levy dkk melakukan penelitian terhadap efek pengeringan batubara dengan tujuan untuk mengurangi kandungan air yang berada di dalam batubara. Dalam penelitiannya, **Levy dkk (2006)** merancang sebuah peralatan eksperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara. Pengujian alat eksperimen ini dilakukan di Energy Research Center, Lehigh University, Pennsylvania, Amerika Serikat. Penelitian ini dimulai pada 2 Desember 2002 dan berakhir pada 31 Maret 2006. Dalam rangka untuk mengurangi kandungan air pada batubara, maka dalam penelitian ini meneliti dugaan terhadap beberapa faktor yang berpengaruh dalam laju pengeringan batubara. Faktor-faktor tersebut antara lain ukuran partikel batubara, kecepatan udara pengering, suhu *tube heater* dan kandungan air dalam udara pengering. Pada penelitian ini, digunakan batubara jenis *lignite* dan batubara *subbituminous* yang didapatkan dari *powder basin river* (PBR). Berbagai variabel tersebut diuji satu per satu. Ruang pengeringan bertipe *fluidized bed* ini memiliki diameter 6 inci. Udara pengering dirancang mencapai suhu 100 °F sampai 150 °F dengan kecepatan *velocity inlet* mencapai 1.6 m/s. Skema pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Skema Alat Eksperimen Pengujian Edward K. Levy 2006

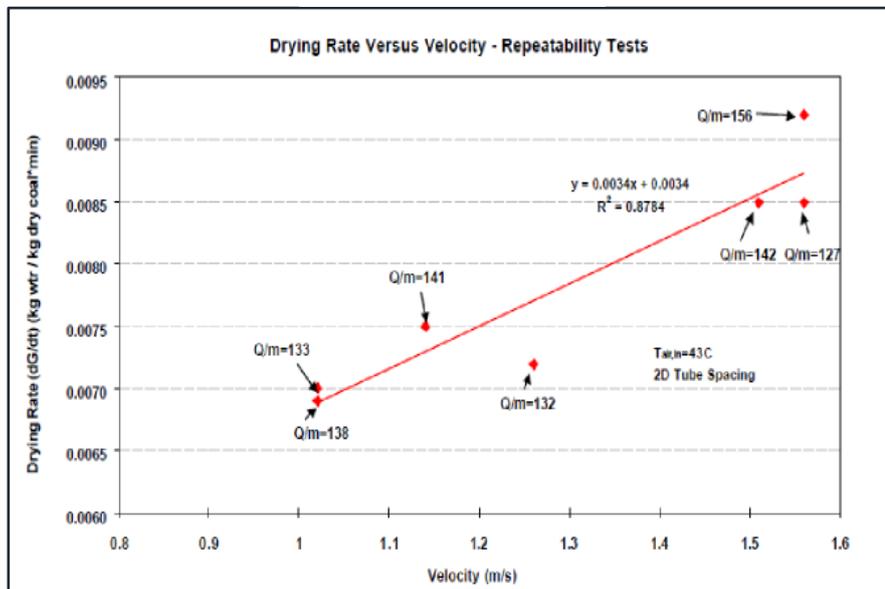
Sumber : (Levy, 2006)

Hasil dari penelitian ini yaitu berupa beragam data dengan berbagai variasi percobaan yang dilakukan pada variabel percobaan yang telah disebutkan diatas. Beberapa grafik yang menjadi sorotan utama adalah pengaruh kecepatan udara pengering dan pengaruh temperatur udara pengering. pengaruh kecepatan udara pengering terhadap *drying rate* batubara dapat dilihat pada gambar 2.2. Sedangkan, grafik pengaruh temperatur udara pengering terhadap *drying rate* batubara dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.2 Grafik Pengaruh Kecepatan Udara Pengering Terhadap *Drying rate* Penelitian Edward K. Levy 2006

Sumber : (Levy, 2006)



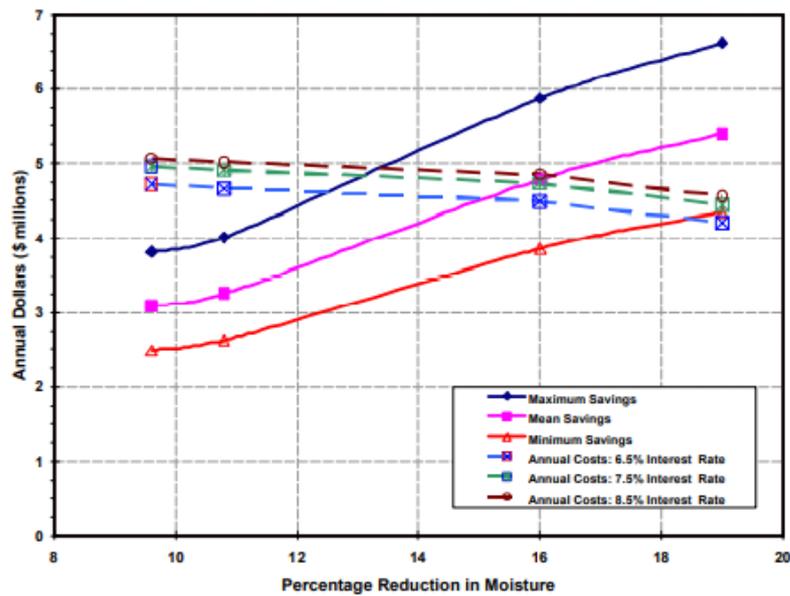
Gambar 2.3 Grafik Pengaruh Temperatur Udara Pengering Terhadap *Drying rate* Penelitian Edward K. Levy 2006

Sumber : (Levy, 2006)

Dapat dilihat bahwa pada gambar 2.2 diatas ialah grafik pengaruh kecepatan udara pengering terhadap *drying rate*. Diketahui bahwa kecepatan udara pengering memiliki pengaruh terhadap laju pengeringan pada batubara. Berdasarkan trendline dari grafik tersebut, bahwa pengaruh tersebut bersifat linear. Hal ini berarti semakin tinggi kecepatan udara pengering, maka semakin tinggi pula laju pengeringan batubara. Kemudian pada gambar 2.3 ialah grafik pengaruh temperatur udara pengering terhadap *drying rate*. Pada grafik diatas diketahui bahwa temperatur udara pengering yang memasuki *drying chamber* juga memiliki pengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Temperatur udara pengering divariasikan pada

rentang suhu 43°C hingga 66°C. Namun, berbeda dengan kecepatan udara, pengaruh temperatur terlihat tidak memiliki *trendline* yang linear. Akan tetapi, dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi temperatur udara pengering, semakin tinggi pula laju pengeringan batubara.

Selain itu, Levy dkk juga mengamati pengaruh laju pengeringan batubara terhadap penghematan. Gambar grafiknya dapat dilihat di bawah ini.



Gambar 2.4 Pengaruh Laju pengeringan Batubara Terhadap Penghematan

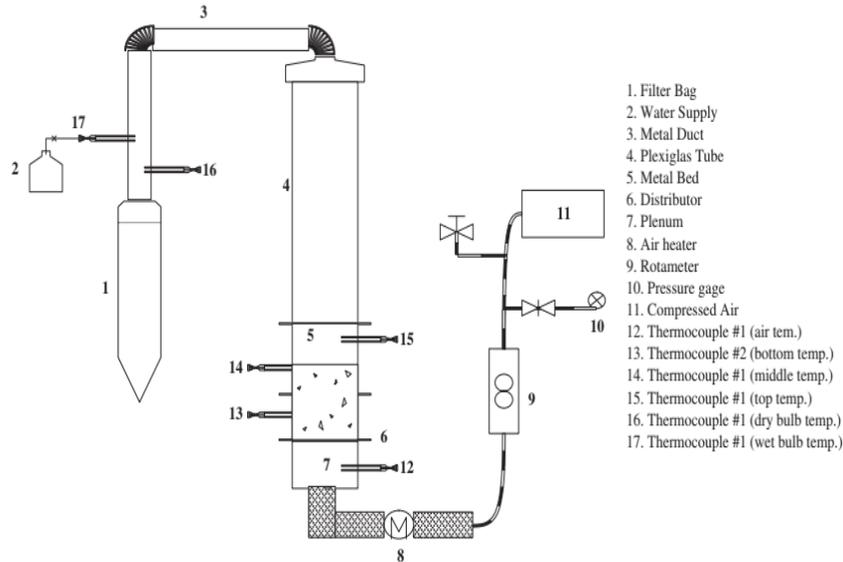
Sumber : (Levy, 2006)

Dari penelitian pengaruh laju pengeringan batubara terhadap penghematan didapatkan hasil penelitian bahwa pemakaian sistem pengering batubara sangat berpengaruh terhadap keuntungan yang didapatkan dari penghematan melalui proses pengeringan batubara. Hal ini dikarenakan kandungan air yang berada di dalam batubara dapat berkurang, sehingga mengakibatkan batubara memiliki nilai kalor yang meningkat dari sebelumnya. Proses pembakaran dengan bahan bakar batubara dalam proses industri akan lebih baik ketika nilai kalor batubara naik. Tentunya apabila pembakaran lebih efektif maka dapat meningkatkan efisiensi anggaran suatu industri.

2.1.2 Wei Cheng Wang (2012)

Wei-Cheng Wang melakukan sebuah penelitian eksperimental pada tahun 2012 mengenai *fluidized bed coal drying* di *Laboratory Investigation of Drying Process of Illinois Coals*. Terdapat tiga tipe jenis batubara yang digunakan untuk penelitiannya, yaitu *buckheart*, *crown mine*, dan *viper mine* dengan nilai *moisture content* berturut-turut 23%, 18%, dan 20%. Adapun dimensi *fluidized bed* yang digunakan mempunyai tinggi *metal bed* 0,38 m dan diameter *bed* 0,15 m. Proses pengeringan dilakukan dengan kecepatan udara pengering *inlet* konstan sebesar 1,25 m/s dan memvariasikan temperatur udara pengering yaitu 43°C - 60°C. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data tiap temperatur dan batubara tiap 5 menit proses

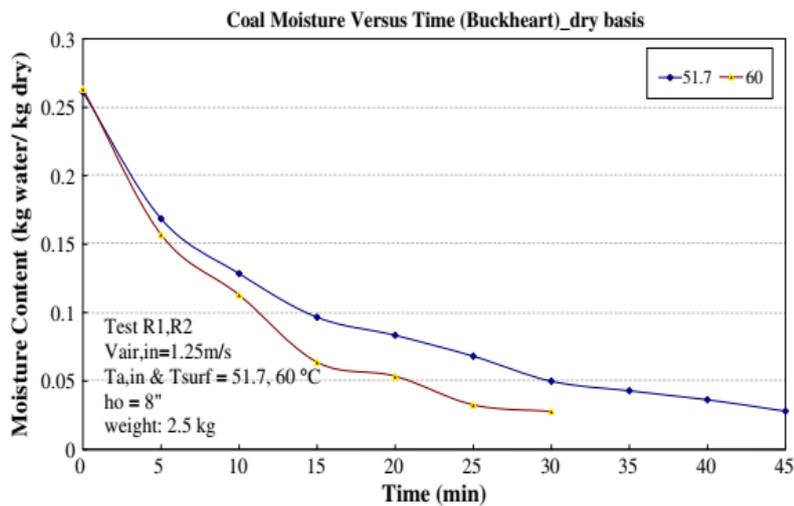
pengeringan. Adapun skema pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 2. 10 dibawah ini.



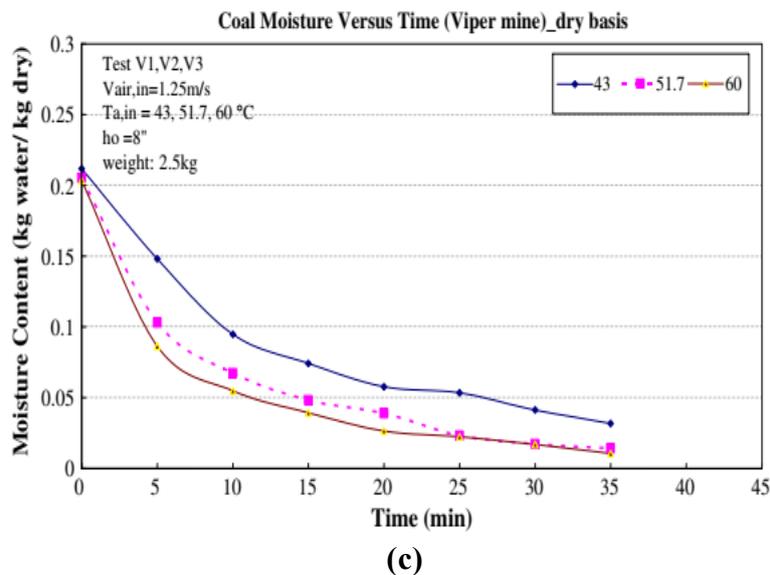
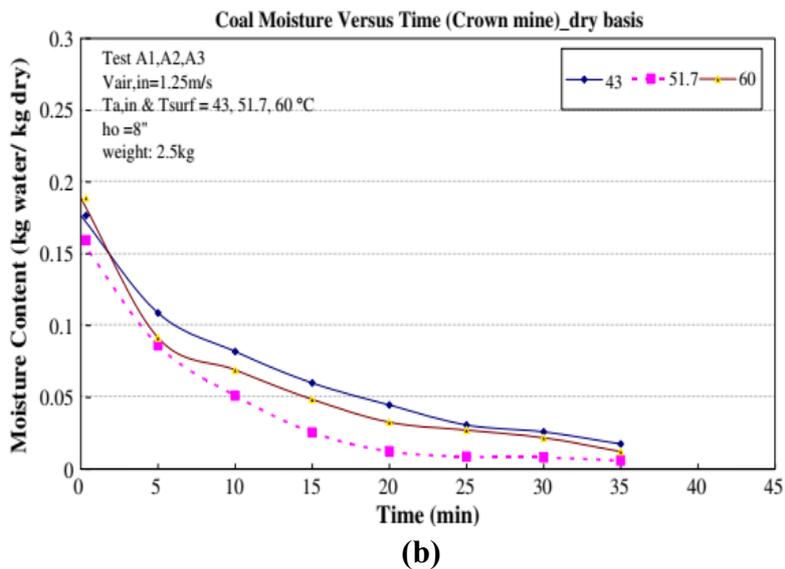
Gambar 2.5 Skema Alat Eksperimen Pengujian Wei Cheng Wang 2012

Sumber : (Wang, 2012)

Dari beberapa data yang telah diambil dan diolah maka didapatkan hasil berupa grafik. Grafik hasil eksperimen Wei Chang Wang dapat dilihat pada gambar 2.6 di bawah. Pada grafik tersebut menunjukkan penurunan *moisture content* pada tiap jenis batubara yaitu *buckheart*, *crown mine*, dan *viper mine*, penurunan *moisture content* ini seiring dengan penambahan waktu. Pada *buckheart* dan *viper mine*, semakin tinggi temperature pengeringan maka semakin kecil nilai *moisture content* yang terkandung, sedangkan pada *crown mine* saat temperature pengeringan 51,7°C *moisture content* yang terkandung lebih kecil daripada temperature pengeringan 60°C dan 43°C.



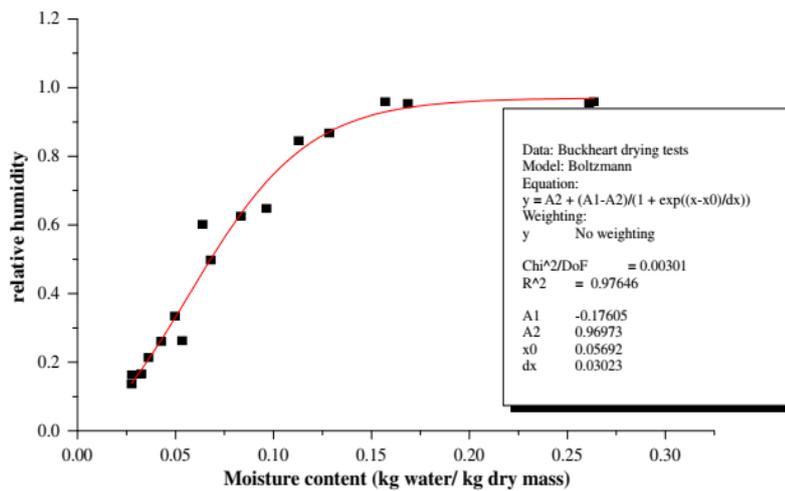
(a)



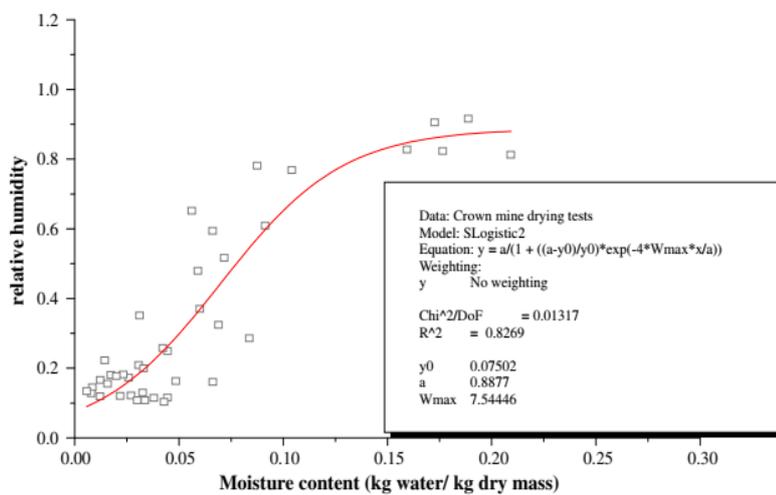
Gambar 2. 6 Grafik *Moisture content vs time* (a) *Buckheart*, (b) *Crown Mine*, (c) *Viper Mine*

Sumber : (Wang, 2012)

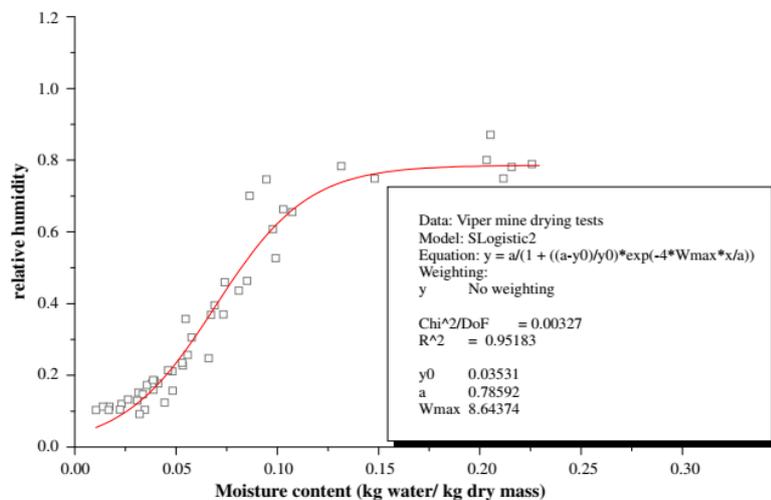
Wei-Cheng Wang (2012) dalam penelitiannya juga melakukan analisa terhadap pengaruh *moisture content* pada nilai *relative humidity* batubara. Pada ketiga jenis batubara yang digunakan yaitu *buckheart*, *crown mine*, dan *viper mine* mempunyai hasil yang sama, sehingga didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi nilai *moisture content*, maka nilai *relative humidity* semakin besar. Hasil dari grafiknya dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah ini.



(a)



(b)



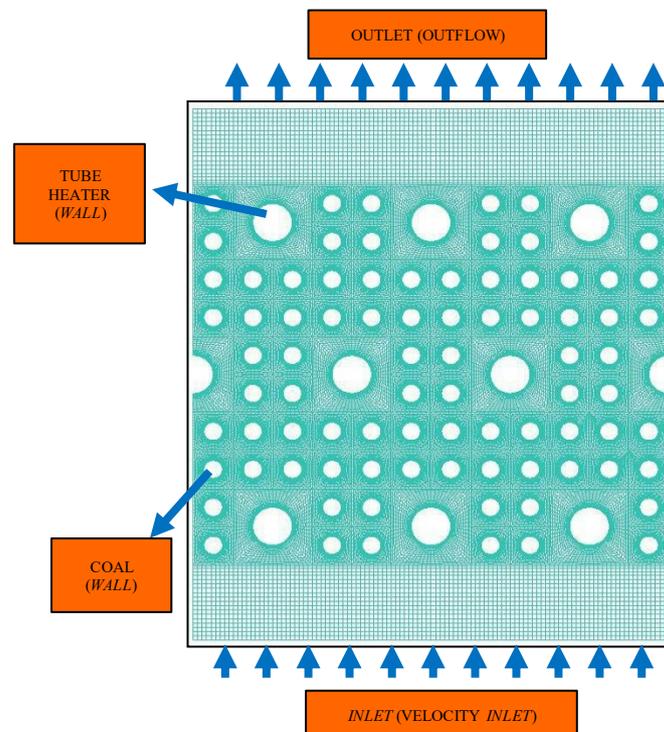
(c)

Gambar 2.7 Grafik Relative Humidity vs Moisture content (a) Buckheart, (b) Crown Mine, (c) Viper Mine

Sumber : (Wang, 2012)

2.1.3 Nuha Sofianita (2021)

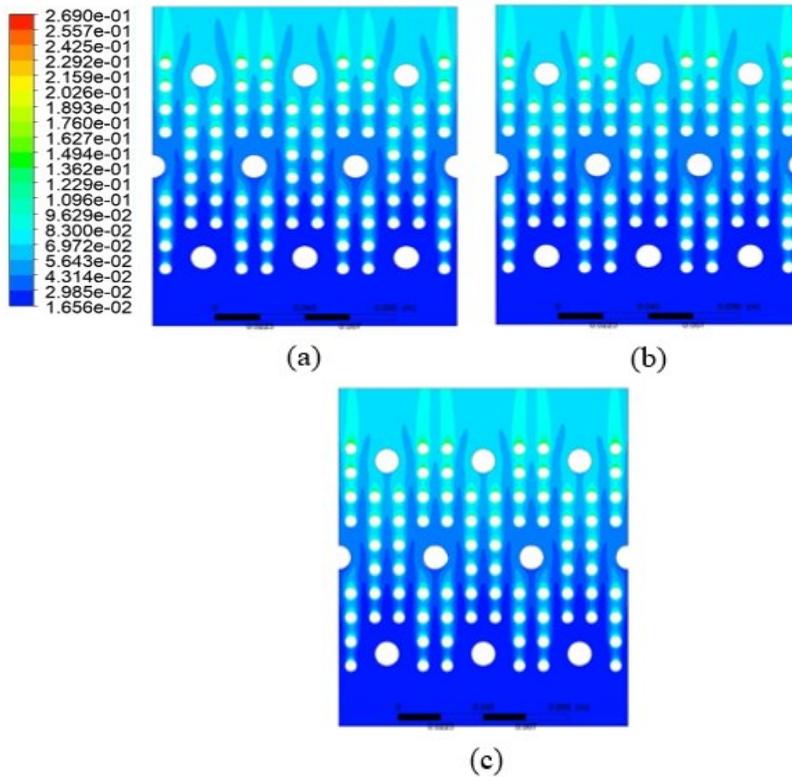
Penelitian tentang teknologi pengeringan batubara secara analisa numerik juga pernah dilakukan oleh **Nuha Sofianita, 2021**. Dalam penelitian tugas akhirnya yang berjudul “Study Numerik Pengaruh Variasi Temperatur dan Kecepatan Fluidisasi Coal Drying pada Fluidized Bed Coal Dryer Terhadap Karakteristik pengeringan Batu bara dengan Tube Heater Tersusun Staggered“, Nuha Sofianita melakukan penelitian terhadap efek pengeringan batubara dengan tujuan untuk mengurangi kandungan air yang berada di dalam batubara. Penelitian ini membuat pemodelan *drying chamber* secara dua dimensi. Diambeter dari *fluidized bed* yaitu sebesar 6 inchi dengan ukuran batubara tersusun secara merata sebesar 6 mm. Adapun pemodelan *drying chamber* yang telah dibuat terlihat pada gambar 2.8.



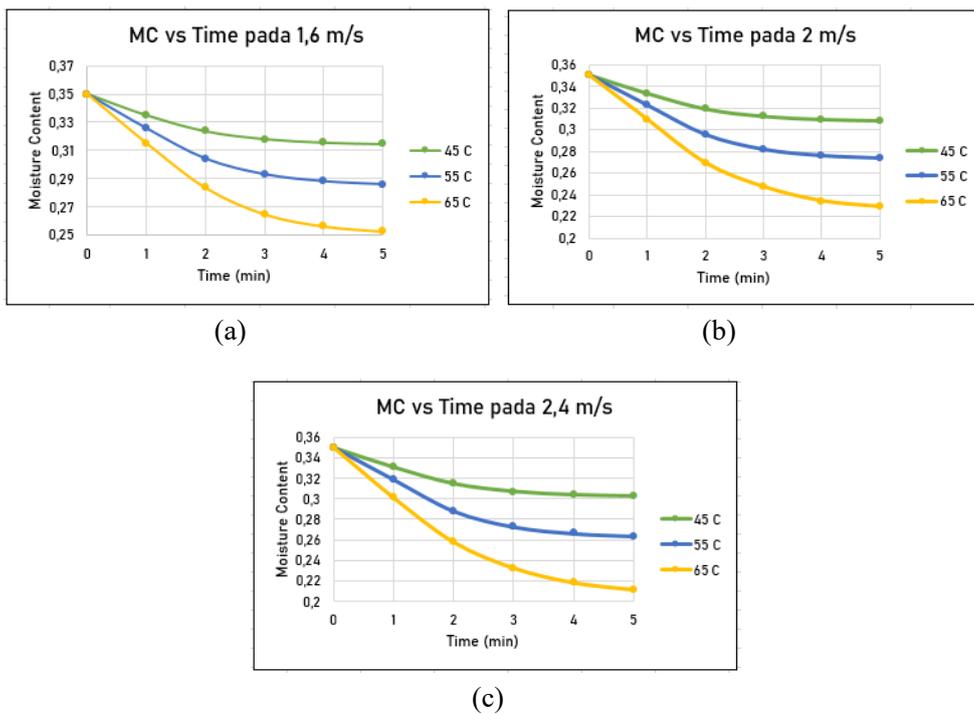
Gambar 2.8 Geometri 2D susunan batubara pada *drying chamber*

Sumber : (Sofianita, 2021)

Dalam penelitiannya tersebut digunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2 untuk menganalisa perpindahan panas dan massa pada batubara. Terdapat dua variasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu temperatur udara pengering dan kecepatan *inlet* udara pengering. dan susunan batubara pada proses pengeringan. Variasi temperatur udara pengering adalah 318°K, 328°K, dan 338°K sementara untuk variasi kecepatan *inlet* udara pengering yaitu 1,6 m/s, 2,4 m/s, dan 2,4 m/s dengan susunan tube heater secara *staggered*. Dari hasil analisa numerik pada ANSYS FLUENT, didapatkan data kualitatif berupa kontur. Berikut ialah hasil kontur fraksi massa H₂O yang didapat.



Gambar 2.10 Kontur fraksi massa H₂O pada kecepatan 1,6 m/s dengan variasi temperatur (a) 45 °C, (b) 55 °C, dan (c) 65 °C



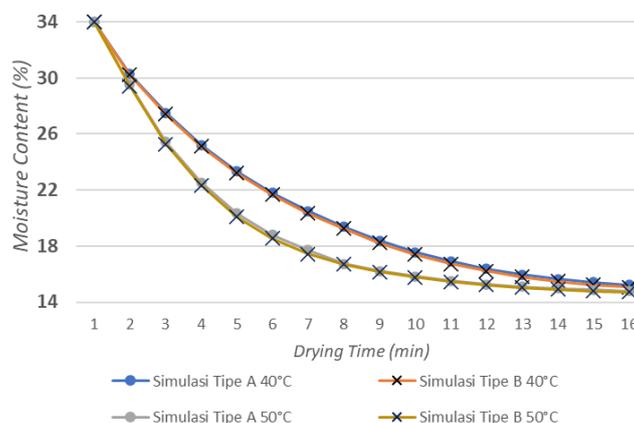
Gambar 2.9 Perubahan *moisture content* dengan variasi kecepatan pada temperatur (a) 1,6 m/s, (b) 2,4 m/s, dan (c) 2,4 m/s

Dari gambar 2.9, memperlihatkan bahwa hasil kontur fraksi massa H₂O pada kecepatan 1,6 m/s dengan variasi temperatur baik 45°C, 55°C, maupun 65°C memiliki perbedaan yang tidak cukup signifikan. Dari ketiga kontur fraksi massa H₂O tersebut menunjukkan bahwa kandungan air pada sisi *outlet* lebih tinggi dibandingkan daerah sisi *inlet*. Hal ini disebabkan karena kandungan air di dalam batubara telah terbawa oleh udara pengering menuju ke *outlet* sehingga semakin ke atas maka kandungan airnya akan semakin banyak. Hal ini menunjukkan pada proses pengeringan ini terjadi proses penurunan *moisture content* pada batubara. Setelah mendapatkan hasil kualitatif, **Nuha Sofianita** melakukan pengolahan data melalui excel untuk mendapatkan data kuantitatif berupa grafik penurunan *moisture content* terhadap waktu. Berikut ialah grafik penurunan *moisture content* terhadap waktu.

Pada gambar 2.10 terlihat bahwa dari ketiga grafik tersebut memperlihatkan *trend* yang hampir sama, yaitu terjadi penurunan *moisture content* yang signifikan pada menit-menit awal pengeringan lalu berubah menjadi landai. Dari semua kecepatan yang digunakan, penurunan *moisture content* paling besar terjadi pada temperatur 65 °C diikuti temperatur 55 °C dan 45 °C. Hal ini berarti semakin tinggi temperatur udara pengering maka besar penurunan *moisture content* pada batubara yang terjadi juga semakin besar. Kemudian semakin lama proses pengeringan berlangsung, selisih temperatur udara pengering dengan temperatur batubara mulai berkurang. Dimana temperatur batubara mulai mendekati temperatur udara *inlet* akibat pengeringan yang berjalan kontinu. Pengeringan akan berhenti ketika nilai temperatur dan *moisture content* batubara mendekati udara pengering.

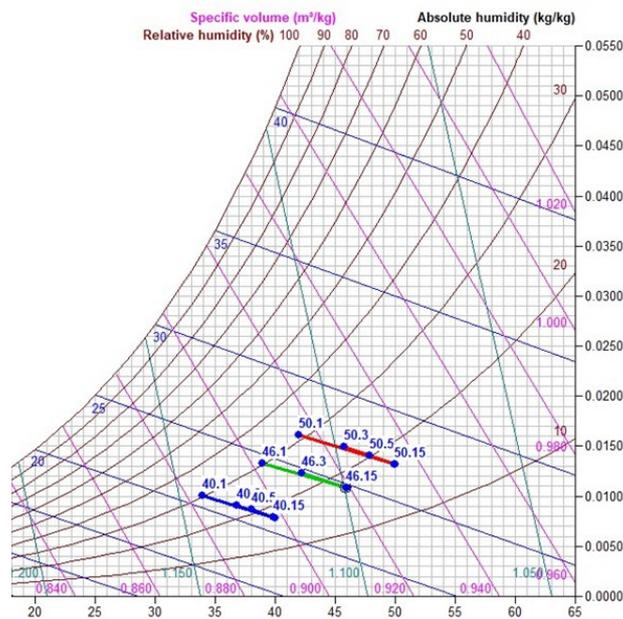
2.1.4 Ajie Satriya Pratama (2020)

Penelitian tentang teknologi pengeringan batubara secara analisa numerik juga pernah dilakukan oleh (Pratama, 2020). Dalam penelitian tugas akhirnya yang berjudul “Simulasi Pengaruh *Perforated Plate* dengan Variasi Suhu Udara Pengering Batubara Terhadap Kinerja *Coal Dryer* dengan Tipe *Fluidized Bed*“, Ajie Satriya melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh *perforated plate* dan temperatur fluida masuk terhadap fenomena pengeringan pada batubara. Terdapat 2 jenis *perforated plate* yang digunakan untuk mengetahui perbedaan *drying rate*. Parameter yang divariasikan pada penelitian ini ada dua macam, yaitu laju tipe *perforated plate* dan temperatur fluida masuk. Variasi *perforated plate* yang diteliti adalah tipe A diameter 10 mm dan tipe B diameter 5 mm serta variasi temperatur fluida masuk adalah 40°C, 42°C, 44°C, 46°C, 48°C dan 50°C. Adapun beban pengeringan setiap variasinya adalah 300 gram. Perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi pada penelitian ini adalah Aspen Plus. Hasil ditampilkan secara kuantitatif berupa data dan grafik *moisture content* batubara dan analisa udara pengering dalam *psychrometric chart*.

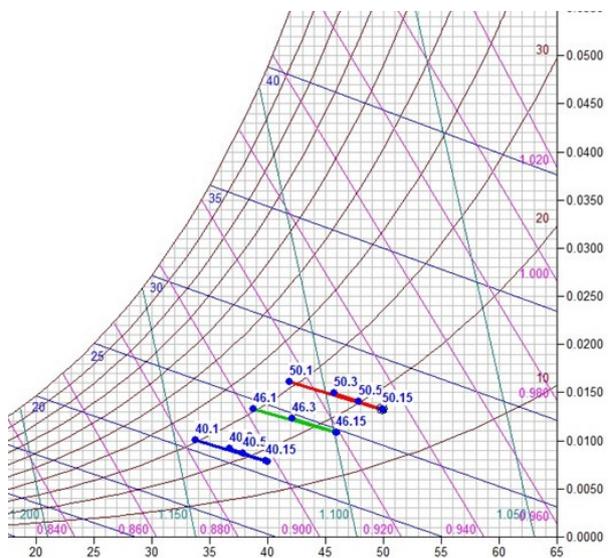


Gambar 2.11 Grafik Simulasi *Moisture Content* Barubara dengan Variasi Tipe *Perforated Plate* Fungsi Waktu pada Temperatur Udara Pengering 40°C dan 50 C

Pada gambar 2.11 di atas adalah grafik *moisture content* batubara dengan variasi *perforated plate* fungsi waktu pada temperatur udara pengering sebesar 40°C dan 50°C. Dapat dilihat bahwa *moisture content* batubara menunjukkan *trendline* yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Dari hasil simulasi terhadap *perforated plate* Tipe A dan Tipe B, dapat disimpulkan bahwa temperatur masuk udara pengering tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penurunan *moisture content* pada batubara. Jika dilihat lebih mendalam, bahwa penurunan *moisture content* lebih baik dihasilkan oleh *perforated plate* Tipe B dibandingkan dengan *perforated plate* Tipe A. Hal ini dapat terjadi disebabkan karena lubang *orifice* pada *perforated plate* Tipe B yang tersebar lebih merata daripada persebaran *orifice* pada *perforated plate* Tipe A.



Gambar 2.13 Psychrometric Chart Udara Keluar pada Perforated Plate Tipe A dengan Temperatur Udara Pengering Masuk 40°C, 46°C dan 50°C

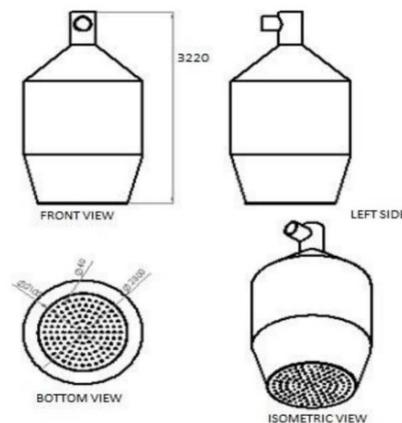


Gambar 2.12 Psychrometric Chart Udara Keluar pada Perforated Plate Tipe B dengan Temperatur Udara Pengering Masuk 40°C, 46°C dan 50°C

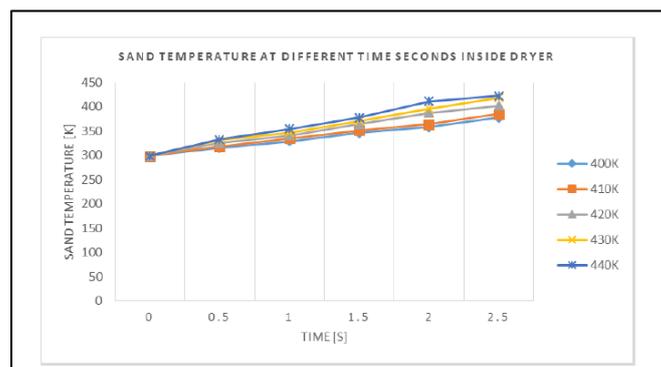
Gambar di atas adalah plot *psychrometric chart* untuk keluaran udara pengering pada *perforated plate* Tipe A ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan plot *psychrometric chart* untuk keluaran udara pengering pada *perforated plate* Tipe B ditunjukkan pada Gambar 4.13. Udara pengering mengalami proses proses *cooling and humidifying* yang mana tergambar dengan perpindahan titik secara vertikal ke kiri atas. Terjadinya perpindahan panas dari udara menuju batubara juga perpindahan massa air dari batubara ke udara maka titik kondisi udara keluar pengering akan menuju kiri atas dari titik kondisi udara masuk pengering. Nilai *humidity ratio* yang lebih tinggi akan menyebabkan titik kondisi masukan udara pengering pada variasi temperatur masukan udara pengering akan memiliki letak yang lebih tinggi, begitu pula sebaliknya. Selain itu, temperatur keluaran udara pengering yang lebih rendah pada waktu pengeringan yang sama mengakibatkan titik posisi udara keluaran pada variasi temperatur masukan udara pengering akan lebih rendah dimana letak posisinya berada titik sebelah kanan pada waktu pengeringan yang sama.

2.1.5 Jibin Antony dan M.B Shyamkumar (2016)

Penelitian tentang teknologi pengeringan secara analisa numerik juga pernah dilakukan oleh Jibin Antony dan M.B. Shyamkumar (2016) dimana melakukan pengeringan partikel pasir menggunakan *Fluidized Bed Dryers*, hal itu dibahas dalam penelitiannya yang berjudul "*Study on Sand Particles Drying in a Fluidized Bed Dryer using CFD*". Pada penelitian ini, aplikasi yang digunakan untuk memodelkan proses pengeringan partikel pasir menggunakan *Fluidized Bed Dryer* disimulasikan menggunakan ANSYS FLUENT 14.5. Adapun variasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu temperatur *inlet*. Simulasi dilakukan berdasarkan pada pendekatan model multifase Eulerian-Eulerian yaitu secara transien.



Gambar 2.15 Geometri 3D *Fluidized Bed Dryer*



Gambar 2.14 Grafik Temperatur Pasir vs Time dengan Variasi Temperatur Inlet

Gambar 2.14 ialah geometri 3D *fluidized bed coal dryer* kemudian pada gambar 2.15 adalah grafik temperatur pasir terhadap waktu pada variasi temperatur *inlet*. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa semakin besar temperatur udara *inlet*, maka temperatur partikel pasir di dalam pengering juga meningkat. Pada temperatur *inlet* 400 K, partikel pasir mencapai 373 K dalam waktu 2,5 detik di dalam *chamber* pengering. Selain itu, pada temperatur 410 K, waktu berkurang menjadi sekitar 2,3 detik. Dengan peningkatan temperature inlet, partikel pasir mencapai 373 K di dalam pengering dengan waktu yang lebih singkat. yaitu, laju pengeringan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur. Tetapi dari 430 K ke 440 K perubahannya lebih kecil dibandingkan dengan temperatur inlet lainnya. Jadi untuk studi tersebut, suhu optimum untuk udara masuk diamati pada 430 K.

Kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian ini yaitu studi CFD pengeringan partikel pasir dalam *fluidized bed dryer* dengan menggunakan ANSYS FLUENT 14.5, dimana model multifase Euler telah digunakan untuk mensimulasikan aliran partikel di dalam pengering. Setelah hasil simulasi dapat digabungkan dengan diperoleh hasil percobaan, untuk temperatur udara keluar dan kecepatan udara keluar. Dengan kenaikan suhu udara masuk, suhu partikel pasir di dalam pengering juga meningkat. Saat suhu udara masuk meningkat, laju pengeringan partikel pasir juga turut naik (Shyamkumar, 2016).

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Batubara

Batubara merupakan salah satu bahan bakar fosil yang terbentuk dari endapan organik, utamanya berasal dari sisa-sisa tumbuhan. Batubara terbentuk akibat perubahan secara fisika dan kimia yang terjadi dalam temperatur dan tekanan yang tinggi, serta membutuhkan waktu yang lama hingga jutaan tahun. Sumber energi ini didefinisikan sebagai batuan sedimen yang mudah terbakar, dikarenakan memiliki kandungan karbon yang tinggi sebesar 65-95%. Kandungan karbon ini termasuk salah satu unsur penyusun utama batubara. Selain itu, unsur penyusun batubara juga terdiri atas oksigen (O), hidrogen (H), nitrogen (N), belerang (S), serta beberapa unsur logam pengotor yang terjebak saat pembentukan batubara. Dikarenakan sifatnya yang mudah terbakar, menjadikan batubara sebagai salah satu bahan bakar dalam dunia pembangkitan listrik di dunia, serta memiliki peran terbesar dalam penyediaan energi listrik di Indonesia.

Terdapat beberapa tahapan analisis untuk mengetahui jenis batubara berdasarkan kualitasnya. Analisis yang perlu dilakukan diantaranya yaitu analisis proksimat, analisis persentase sulfur, dan analisis nilai kalor. Penentuan kualitas batubara ini sangat berguna untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap agar standar batubara yang diperlukan sesuai dengan kebutuhan pembangkit. Apabila menggunakan batubara kualitas tinggi, maka dapat meningkatkan efisiensi dari PLTU (R. Kaur, 2015). Analisis proksimat yaitu meliputi *moisture content*, *volatile matter*, *ash content*, dan *fixed carbon*. Analisis proksimat merupakan cara yang paling sederhana dalam mengetahui kualitas batubara, sehingga sering digunakan konsumen sebagai pertimbangan dalam membeli batubara (Sepfitrah, 2016). Analisis persentase sulfur terdiri dari *pyritic*, *sulfate*, dan *organic*. Dalam penentuan nilai kalor batubara, sulfur menjadi salah satu parameter yang penting untuk dianalisis. Hal ini dikarenakan sulfur dapat memberikan dampak yang buruk terhadap lingkungan dalam bentuk emisi SO₂. Sehingga persentasenya harus dipastikan berada dibawah ambang batas yang telah ditetapkan (Zhu, 2014).

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh suhu, tekanan, dan lamanya waktu pembuatan, batubara diklasifikasikan dalam istilah *rank coal* berdasarkan kandungan air yang ada di dalamnya. Berikut klasifikasinya dapat dilihat pada gambar 2.16. Pada gambar 2.16 menunjukkan klasifikasi jenis batubara terdiri atas *peat coal*, *lignite coal*,

sub-bituminous coal, *bituminous coal*, dan *anthracite*. Berikut penjelasan masing-masing jenis batubara.



Gambar 2.16 Klasifikasi Jenis Batubara

- Anthracite* merupakan klasifikasi batubara tertinggi, memiliki ciri khas warna hitam berkilauan (*luster*) metalik, mengandung unsur karbon sebesar 86-98%, kadar air kurang dari 10%, dan kandungan kalori di atas 5000 kkal/kg. Batubara jenis ini jumlahnya terbatas dan harganya relative mahal disbanding jenis batubara lainnya.
 - Bituminous* merupakan jenis batubara dengan kandungan karbon sebesar 45-86% dan kadar air sebesar 10-25%, dengan kalori sebesar 4000-5000 kkal/kg.
 - Subbituminous* merupakan jenis batubara dengan kandungan karbon sebesar 35-45% dan kadar air sebesar 25-35%, dengan kalori sebesar 2500-4000 kkal/kg.
 - Lignite* merupakan jenis batubara coklat yang sangat lunak dengan kandungan air sebesar 35-60%, kandungan karbon sebesar 25-35% dan, dan kalori sebesar 2500 kkal/kg. Batubara jenis ini kurang efisien jika digunakan sebagai bahan bakar karena kandungan karbonnya yang rendah. Namun, keuntungan dari batubara jenis ini yaitu harganya relative murah.
 - Peat* merupakan jenis batubara dengan kadar air di atas 60%, memiliki lapisan luar yang berpori. Jenis batubara ini memiliki nilai kalori yang sangat rendah.
- Berikut ialah tabel komposisi dan parameter fisik pada tiap jenis batubara.

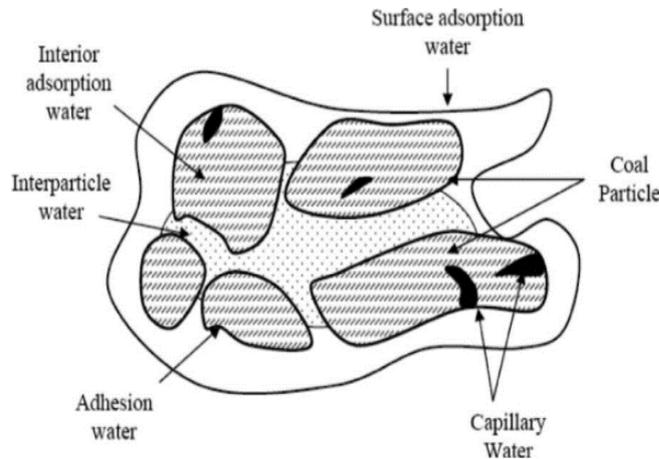
Tabel 2.1 Komposisi dan Parameter Fisik Batubara

	Anthracite	Bituminous	Subbituminous	Lignite
Moisture (%)	3-6	2-15	10-25	25-45
Volatile matter (%)	2-12	15-45	28-45	24-32
Fixed carbon (%)	75-85	50-70	30-57	25-30
Ash (%)	4-15	4-15	3-10	3-15
Sulfur (%)	0.5-2.5	0.5-6	0.3-1.5	0.3-2.5
Hydrogen (%)	1.5-3.5	4.5-6	5.5-6.5	6-7.5
Carbon (%)	75-85	65-80	55-70	35-45
Nitrogen (%)	0.5-1	0.5-2.5	0.8-1.5	0.6-1.0
Oxygen (%)	5.5-9	4.5-10	15-30	38-48
Btu/lb	12,000-13,500	12,000-14,500	7500-10,000	6000-7500
Density (g/mL)	1.35-1.70	1.28-1.35	1.35-1.40	1.40-1.45

Sumber : (*Speight, 2005*)

Salah satu parameter utama dalam penelitian ini yaitu *moisture content*. *Moisture content* yaitu persentase kandungan air yang berada di dalam batubara. Pada penjelasan klasifikasi jenis batubara, didapatkan bahwa lignit memiliki nilai *moisture content* yang besar yang artinya

kualitasnya rendah. Hal ini disebabkan *moisture content* yang tinggi akan menghambat proses pembakaran, dikarenakan proses penguapan kandungan air pada batubara membutuhkan energi sehingga nilai kalor yang dihasilkan oleh proses pembakaran batubara akan menurun. Pengelompokkan kandungan air pada batubara terdiri atas lima jenis, yaitu *surface adsorption water*, *interior adsorption water*, *capillary water*, *inter particle water*, dan *adhesion water* (Allardie D.J, 1978)



Gambar 2.17 Klasifikasi Kandungan Air pada Batubara

Berikut penjelasan masing-masing klasifikasi kandungan air pada batubara.

- Surface adsorption water* yaitu lapisan molekul air yang terdapat pada permukaan partikel batubara yang terikat secara kimiawi.
- Interior adsorption water* yaitu kandungan air yang terperangkap pada pori - pori mikro dan kapiler mikro.
- Capillary water* yaitu kandungan air yang berada pada kapiler partikel batubara.
- Inter particle water* yaitu kandungan air yang berada di dalam celah - celah antara dua atau lebih partikel batubara.
- Adhesion water* yaitu lapisan air yang berada pada permukaan partikel batubara.

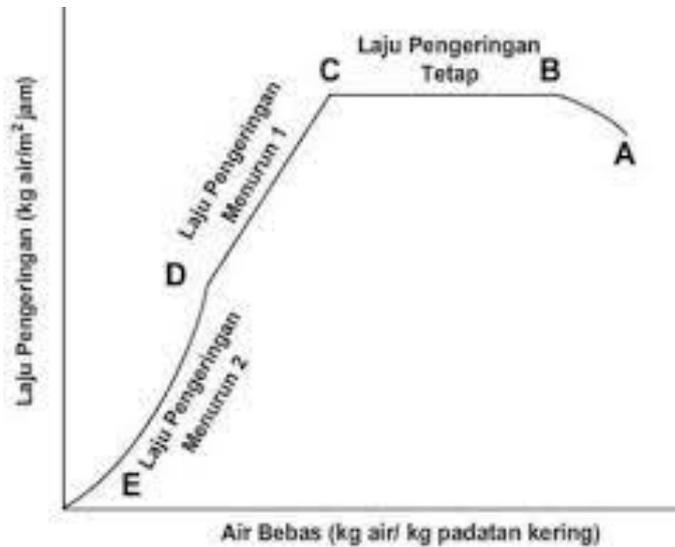
2.2.2 Mekanisme Pengeringan

Pengeringan yaitu proses menghilangkan kadar air pada suatu bahan atau pemisahan yang relatif kecil dengan cara menguapkan kandungan air pada bahan tersebut menggunakan energi panas. Pada proses pengeringan terjadi pengurangan *moisture content* pada produk, hal ini untuk mendapatkan nilai kalor setinggi mungkin. Pengeringan terdiri dari dua tahapan, tahapan pertama yaitu transfer panas dimana panas dihasilkan di dalam zat padat dan dialirkan ke permukaan luar. Hal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan temperatur akibat pemanasan yang terjadi. Kemudian tahapan kedua yaitu transfer massa berupa perpindahan *moisture* ke permukaan zat padat yang pada akhirnya menguap dari permukaan tersebut dan bercampur dengan udara pemanas. Hal ini mengakibatkan nilai kandungan air pada udara pemanas tersebut meningkat. *Moisture content* dihitung berdasarkan rasio dari banyaknya kandungan air dalam sampel terhadap berat sampel tersebut.

$$\%MC = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{sampel}}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.1)$$

Proses pengeringan dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhi dibagi menjadi 2 golongan, yaitu dari sisi material yang dikeringkan dan sisi fluida pengering. Adapun faktor yang mempengaruhi proses pengeringan dari sisi material

yaitu massa material/beban pengeringan, ukuran partikel material, *moisture content* awal dari material, dan temperatur awal material. Sedangkan dari sisi fluida pengering, faktor yang mempengaruhi yaitu temperatur udara, kecepatan volumetrik aliran udara, dan kelembaban udara. Lamanya proses pengeringan bergantung pada bahan yang dikeringkan dan cara pemanasan yang digunakan, lalu untuk waktu proses pengeringan ditetapkan dalam tiga tahapan (Sing, 2009) seperti pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Periode Proses Pengeringan

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

Berikut ialah penjelasan pada masing-masing periode proses pengeringan.

a. Periode laju pengeringan naik

Sesaat setelah bahan menerima panas dari udara pengering, maka temperatur benda akan naik hingga mencapai kesetimbangan dengan temperatur *wet bulb* udara (T_{wb}). Kurva A-B naik, dikarenakan temperatur awal batubara lebih rendah daripada temperatur *wet bulb* udara pengering.

b. Periode laju pengeringan konstan

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

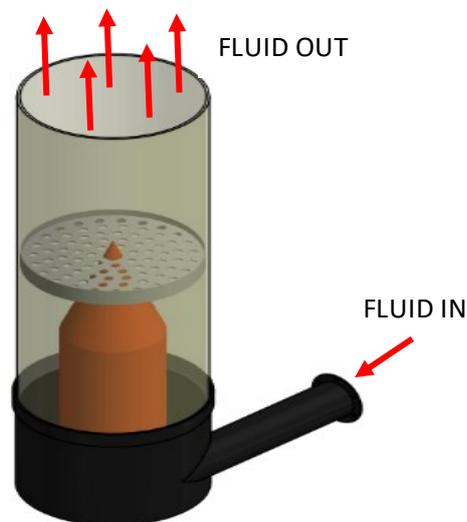
c. Periode pengeringan menurun

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 batubara dan selanjutnya karena perbedaan konsentrasi 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.

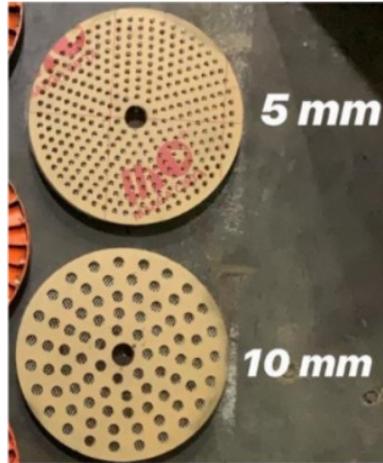
2.2.3 *Fluidized Bed Coal Dryer*

Fluidized bed coal dryer adalah suatu alat pengeringan batubara yang menggunakan prinsip dasar fluidisasi. Fluidisasi terjadi ketika partikel batubara yang berada di dalam *drying chamber* dialiri oleh fluida (udara pengering) melewati bagian bawah *bed* dengan kecepatan tertentu, sehingga partikel batubara dapat melayang akibat *drag force* udara yang lebih besar dibandingkan gaya *body* dan berat batubara itu sendiri. *Fluidized bed dryer* berguna untuk mengeringkan bubuk, butiran, aglomerat, dan pelet dengan kisaran ukuran 50 hingga 5000 μm . Sedangkan untuk partikel di luar kisaran ukuran baik terlalu kecil atau terlalu besar untuk difluidisasi dan mungkin memerlukan gaya tambahan, yaitu getaran, untuk melikuidasi (Mak, 2007).

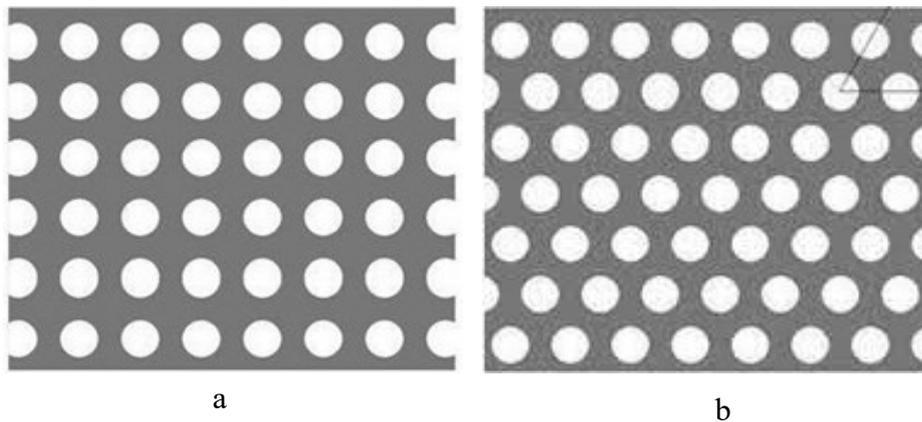


Gambar 2.19 *Fluidized Bed Coal Dryer*

Gambar 2.19 menunjukkan penampakan *fluidized bed coal dryer*. Terdapat berbagai jenis *bed* yang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik aliran fluida di atasnya. Salah satu jenis *bed* tersebut yaitu *perforated plate bed*. *Perforated plate bed* merupakan *bed* yang terdiri dari lubang-lubang yang dinamakan *orifice*. Jenis *perforated plate* sendiri ada berbagai macam, bergantung pada susunan konfigurasi atau diameter lubang *orifice*-nya seperti pada gambar 2.20 dan 2.21



Gambar 2.20 *Perforated plate Berdasarkan Ukuran Diameter*



Gambar 2.21 *Perforated plate Berdasarkan Konfigurasi Susunan*
(a) *Aligned*, (b) *Staggered*

Pada gambar 2.20 diatas menunjukkan gambar dari bentuk *perforated plate* dengan perbedaan diameter lubang. Untuk gambar 2.21 menunjukkan perbedaan konfigurasi susunan lubang, untuk 2.21 a yaitu *perforated plate* tersusun *aligned*, sedangkan untuk gambar 2.21 b yaitu *perforated plate* tersusun *staggered*.

Pada *fluidized bed dryer*, kecepatan minimum fluidisasi merupakan salah satu faktor kecepatan yang penting untuk diketahui. Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya kecepatan minimum fluidisasi seperti dinyatakan dalam persamaan Ergun yaitu diameter partikel, viskositas udara, percepatan gravitasi dan berat jenis partikel, sedangkan untuk persamaan yang banyak dipakai dalam penelitian *fluidized bed* ini tidak memperhitungkan gaya antar partikel dan rongga udara (*voidage*) pada saat terjadi fluidisasi dapat diabaikan (Horio, 1975). Kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) yaitu kecepatan superficial suplai udara dimana tempat terjadinya fluidisasi sehingga penggelembungan atau *spouting* akan tercapai. Kecepatan minimum fluidisasi meningkat dengan ukuran dan kepadatan partikel dikarenakan pengaruh secara langsung oleh sifat fluida (Rhodes, 2008). Kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) pada partikel yang berbentuk bulat dapat diestimasi dengan menghitung *Archimedes number* (Ar), yaitu:

$$Ar = \frac{\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \dots \dots \dots (2.2)$$

Setelah menghitung *Archimedes number*, *Reynolds number* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Wen dan Yu.

$$Re_{mf} = \sqrt{(33,7^2 + 0,0408Ar)^2 - 33,7} \dots \dots \dots (2.3)$$

Sehingga kecepatan minimum fluidisasi dapat dicari dari persamaan *Reynold number* berikut.

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu}$$

$$u_{mf} = \frac{Re_{p,mf} \mu}{\rho_g d_p} \dots \dots \dots (2.4)$$

Namun, jika kecepatan yang dialirkan semakin meningkat dapat menyebabkan partikel terbawa keluar dari ruang pengering. Sehingga juga perlu diketahui kecepatan maksimum fluidisasi atau yang disebut dengan kecepatan terminal yang dapat digunakan. Kecepatan terminal dapat diperoleh melalui persamaan berikut.

$$u_t = d_p \left(\frac{1,78 \times 10^{-2} [g(\rho_p - \rho_g)]^2}{\rho_g \mu} \right)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots (2.5)$$

2.2.4 Prinsip Perpindahan Massa pada Batubara

Perpindahan massa merupakan salah satu aspek penting dalam proses pengeringan. Pada saat dilakukan pengeringan oleh *fluidized bed dryer* pada satuan waktu pengeringan, *moisture content* yang terdapat pada permukaan partikel batubara akan berpindah ke udara pengering karena terjadi penguapan. Kemudian, sebagian *moisture content* yang terdapat pada rongga-rongga kapiler partikel batubara juga akan mengalami proses difusi menuju ke permukaan batubara, dan pada akhirnya ikut terbawa oleh udara pengering. Dengan menggunakan prinsip perpindahan massa, maka kita dapat menelusuri dan mengetahui lebih dalam tentang perpindahan massa yang terjadi antara batubara dengan udara pengering.

a. Perpindahan uap air dari dalam ke permukaan batubara

Perpindahan massa pada rongga-rongga kapiler partikel batubara ke permukaan partikel batubara terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi. Konsentrasi air pada bagian dalam batubara lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi air pada permukaan partikel batubara. Dengan menganggap suatu lapisannya tipis, maka gerakan uap air dari rongga-rongga kapiler batubara menuju permukaan partikel batubara dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Fick untuk difusi satu dimensi.

$$N''_{wf,x} = -D_{AB} \frac{\partial C_w}{\partial x} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$n''_{wf,x} = -D_{AB} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana:

N''_{wf} = fluks molar uap air (kg.mol/s.m²)

n''_{wf} = fluks massa uap air (kg / s.m²)

D_{AB} = Koefisien difusi binary dari material (m²/s)

$\frac{\delta C_w}{\delta x}$ = Perbedaan konsentrasi uap air dalam arah x (kg.mol/m⁴)

$\frac{\delta \rho_w}{\delta x}$ = Perbedaan rapat massa uap air dalam arah x (kg.mol/m⁴)

b. Perpindahan uap air dalam permukaan batubara ke udara pengering

Perpindahan massa dari permukaan partikel batubara menuju ke udara pengering dalam proses pengeringan terjadi secara konveksi. Laju pengeringan massa secara konveksi ditentukan dengan persamaan berikut.

$$N_A'' = h_m(C_{A,s} - C_{A,\infty}) \dots \dots \dots (2.8)$$

$$n_A'' = h_m(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana:

h_m = koefisien konveksi perpindahan panas (m/s)

$C_{A,s}$ = konsentrasi uap air di permukaan material (kgmol/m³)

$C_{A,\infty}$ = konsentrasi uap air di medium pengering (kgmol/m³)

$\rho_{A,s}$ = rapat massa uap air di permukaan batubara (kg/m³)

ρ_A = rapat massa uap air di medium pengering (kg/m³)

2.2.5 Analisa Perpindahan Panas dan 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. Parameter Pr dan Sc sebanding dengan Nu dan Sh (Incropera, 2005).

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

Sehingga

$$\frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n} \dots \dots \dots (2.10)$$

dimana:

- Nu (bilangan Nusselt) adalah gradien temperatur *dimensionless* pada permukaan.

$$Nu = \frac{hL}{k} \dots \dots \dots (2.11)$$

- Sh (bilangan Sherwood) adalah gradien konsentrasi *dimensionless* pada permukaan.

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \dots \dots \dots (2.12)$$

- Pr (bilangan Prandtl) adalah perbandingan antara momentum dan difusivitas panas.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \dots \dots \dots (2.13)$$

- Sc (bilangan Schmidt) adalah perbandingan antara momentum dan difusivitas massa.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \dots \dots \dots (2.14)$$

Selain itu, Pr dan Sc juga berkaitan dengan Le (*Lewis number*) yang merupakan perbandingan difusivitas termal dan difusivitas massa, sehingga didefinisikan sebagai berikut.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} \dots \dots \dots (2.15)$$

Setelah disubstitusi, maka:

$$\frac{hL/k}{Pr^n} = \frac{h_m L/D_{AB}}{Sc^n}$$

$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^n} \dots \dots \dots (2.16)$$

Sehingga nilai koefisien perpindahan massa (h_m) yang didapatkan dari persamaan ialah:

$$h_m = \frac{h x D_{AB} x Le^n}{k} \dots \dots \dots (2.17)$$

dengan:

- h = koefisien perpindahan panas (W/m^2K)
- h_m = koefisien perpindahan massa (m/s)
- k = konduktivitas termal udara pengering (W/mK)
- D_{AB} = Mass diffusivity air pada udara (m^2/s)
- Le = Lewis number (*non-dimensional*)

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

$$n_A'' = h_m x (\rho_{H_2O_{coal}} - \rho_{H_2O_{inlet}}) \dots \dots \dots (2.18)$$

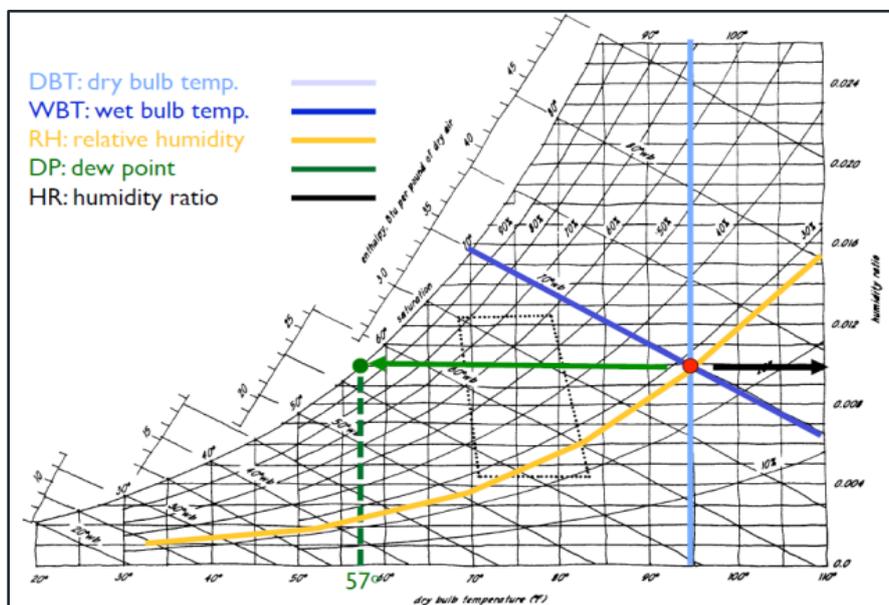
$$n_A = n_A'' x A \dots \dots \dots (2.19)$$

dimana:

- h = Heat transfer coefficient (W/m^2K)
- h_m = Mass transfer coefficient (m/s)
- k = Thermal conductivity (W/mK)
- D_{AB} = Diffusivity (m^2/s)
- C_p = Specific heat ($J/kg.K$)
- α = Thermal diffusivity (m^2/s)

2.2.6 Prinsip Psychrometric Chart pada Udara Pengeringan

Analisis yang dapat dilakukan pada *perforated plate fluidized bed coal dryer* tidak hanya pada sisi batubara sebagai material yang dikeringkan, namun pada udara pengering juga dapat dilakukan analisa. Karakteristik udara pengering dapat diketahui melalui analisis menggunakan *psychrometric chart*. *Psychrometric chart* merupakan bidang ilmu yang mempelajari tentang karakteristik campuran antara udara dan uap air. Analisis *psychrometric chart* dapat dilakukan pada *perforated plate fluidized bed coal dryer* dikarenakan udara pengering yang melewati batubara akan membawa *moisture content* yang lepas dari batubara tersebut. Pada *psychrometric chart*, terdapat berbagai properti yang dapat mendefinisikan tingkatan keadaan udara pengering. Pada Gambar 2.22, terlihat adanya 5 properti tersebut,



Gambar 2.22 Properti Psychrometric Chart

antara lain *dry bulb temperature*, *wet bulb temperature*, *dew point temperature*, *relative humidity* dan *humidity ratio*. Selain itu, terdapat pula 2 proses yang terjadi pada udara pengering dan dapat dianalisis dengan menggunakan prinsip *psychrometric chart*.

a. *Dry Bulb Temperature*

Dry Bulb Temperature (T_{DB}) atau biasa disebut *air temperature* merupakan properti udara yang paling umum digunakan. Pada dasarnya mengacu pada suhu udara sekitar dan indikator dari kadar panas. Pada *dry bulb temperature* tidak terpengaruh oleh kelembaban udara. *Dry bulb temperature* dapat diukur dengan menggunakan thermometer normal yang terpapar bebas ke udara dengan ujung sensor dalam keadaan kering dan terlindung dari radiasi.

b. *Wet Bulb Temperature*

Wet Bulb Temperature (T_{WB}) merupakan temperatur saturasi adiabatik. Temperatur ini yaitu temperatur yang ditunjukkan oleh termometer dengan bohlam yang dibasahkan dan dipaparkan ke aliran udara yang diukur. Biasanya temperatur ini memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan *dry bulb temperature*. Dikarenakan nilainya yang lebih rendah tersebut, *wet bulb temperature* mengindikasikan penguapan adiabatik air dari termometer dan efek pendinginan oleh karena air tersebut. Tingkat penguapan dari air pada bohlam dan perbedaan nilai pada *dry bulb temperature* dan *wet bulb temperature* dipengaruhi oleh kelembaban udara. Oleh karena itu, udara yang memiliki *relative humidity* (RH) 100%, akan memiliki nilai *dry bulb temperature* dan *wet bulb temperature* yang identik.

c. *Dew Point Temperature*

Dew point temperature (T_{DP}) merupakan temperatur dimana uap air mulai mengembun dari udara yang diukur. *Dew point temperature* dapat juga didefinisikan sebagai temperatur dimana udara menjadi sepenuhnya jenuh. Apabila *dew point temperature* dekat dengan *dry bulb temperature*, maka nilai *relative humidity* relatif tinggi. Sebaliknya, apabila *dew point temperature* jauh di bawah *dry bulb temperature*, maka nilai *relative humidity* relatif rendah.

d. *Relative humidity* (ϕ)

Relative humidity (ϕ) merupakan parameter yang menunjukkan banyaknya uap air yang terkandung pada udara dalam fase gas. *Relative humidity* yaitu rasio antara fraksi molekul uap air dalam udara basah, berbanding dengan fraksi molekul uap air maksimal/jenuh pada temperatur dan tekanan yang sama. *Relative humidity* dinyatakan dalam bentuk persentase. Persamaan yang menyatakan besaran *relative humidity* dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\phi = \frac{P_w}{P_{ws}} \dots \dots \dots (2.20)$$

dengan:

ϕ = *relative humidity* (%)

P_w = tekanan parsial uap air dalam udara basah (Pa)

P_{ws} = tekanan saturasi uap air pada temperatur yang sama (Pa)

e. *Humidity Ratio* (ω)

Humidity Ratio merupakan rasio kelembaban antara berat atau massa uap air dan massa udara kering yang terkandung didalam udara pada volume, tekanan dan temperatur tertentu. Untuk mengetahui nilai *humidity ratio* yang ditentukan berdasarkan 1 kg udara kering, rasio kelembaban dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_{dry\ air}} \dots \dots \dots (2.21)$$

dimana:

ω udara = rasio kelembaban H₂O (kg/kg)

m_{H_2O} = massa uap air (H₂O) yang terkandung (kg H₂O)

$m_{dry\ air}$ = massa udara kering (kg udara kering)

Adapun beberapa istilah yang digunakan dalam psikometrik chart pada proses pengeringan batubara selain istilah diatas antara lain:

a. Fraksi massa

Fraksi massa didefinisikan sebagai perbandingan antara berat (kilogram) suatu zat terhadap satu kilogram *mixture*, dirumuskan sebagai berikut

$$Y_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{dry\ air}} \dots\dots\dots (2.22)$$

b. Massa H₂O pada *inlet*

Pada proses pengeringan batubara, dengan mengetahui massa udara yang masuk ke *dryer chamber* maka massa uap air yang terkandung dalam udara dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$m_{H_2O,inlet} = massa\ udara_{inlet} \cdot Y_{H_2O} \dots\dots\dots (2.23)$$

c. Massa H₂O pada *outlet*

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

$$m_{H_2O,outlet} = massa\ udara_{outlet} \cdot Y_{H_2O} \dots\dots\dots (2.24)$$

d. Massa H₂O yang dibawa oleh udara pengering

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

$$\Delta m_{H_2O} = m_{H_2O,outlet} - m_{H_2O,inlet} \dots\dots\dots (2.25)$$

e. Massa H₂O pada permukaan batubara awal

Massa batubara yang diumpankan ke *drying chamber*, maka massa air yang terkandung dalam batubara adalah

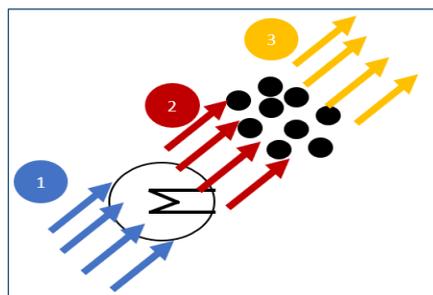
$$m_{H_2O,coal\ awal} = Y_{H_2O} \cdot massa\ batubara \dots\dots\dots (2.26)$$

f. Massa H₂O pada permukaan batubara akhir

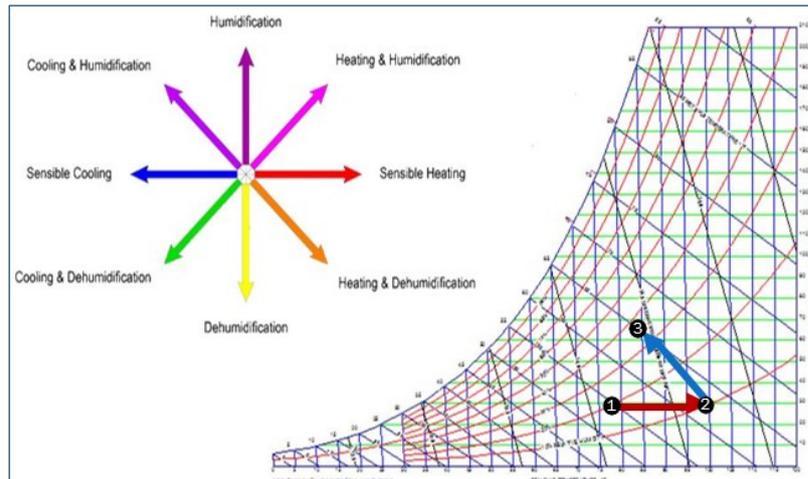
Jumlah kandungan H₂O didalam batubara pada akhir proses dapat dihitung dengan menggunakan perumusan sebagai berikut

$$\Delta m_{H_2O,coal\ akhir} = m_{H_2O,coal\ awal} - \Delta m_{H_2O} \dots\dots\dots (2.27)$$

Proses yang terjadi pada udara pengering dalam *fluidized bed dryer* dapat terlihat pada gambar 2.8 dan 2.9.



Gambar 2. 23 Ilustrasi Proses Pemanasan dan Humidifikasi



Gambar 2.24 Proses Pemanasan dan Humidifikasi pada *Psychrometric Chart*

Sumber: (Moran, 2014)

Keterangan:

a. Proses Pemanasan dan Pendinginan (*sensible heating* dan *sensible cooling*)

Proses Pemanasan merupakan proses penambahan kalor sensibel ke udara sehingga menyebabkan kenaikan temperatur udara. Sedangkan, pendinginan merupakan kebalikannya yaitu proses pengurangan kalor sensibel dari udara sehingga menyebabkan penurunan temperatur udara. Proses pemanasan terjadi ketika udara panas melewati elemen-elemen pemanas pada *heat exchanger*. Sedangkan, proses pendinginan terjadi ketika udara melewati partikel-partikel batubara sehingga terjadi proses konveksi. Pada Gambar 2.23, ilustrasi proses pemanasan ditunjukkan oleh panah berwarna merah dari angka 1 ke 2, sementara proses pendinginan yang disertai humidifikasi ditunjukkan oleh panah berwarna biru dari angka 2 ke 3.

b. Proses Humidifikasi

Humidifikasi merupakan proses penambahan jumlah uap air pada udara sehingga udara mengalami kenaikan nilai *humidity ratio*. Proses ini dapat terjadi tanpa disertai perpindahan kalor sensibel sekalipun. Namun pada *fluidized bed dryer*, proses humidifikasi pada udara pengering disertai dengan proses *sensible cooling*. Proses humidifikasi terhadap udara terjadi saat udara pengering melewati partikel batubara sehingga membawa sebagian *moisture* dari partikel batubara tersebut. Pada gambar 2.23, ilustrasi proses humidifikasi ditunjukkan oleh panah berwarna biru dari angka 2 ke 3. Pada dasarnya, gambar 2.23 dan gambar 2.24 menunjukkan ilustrasi pada proses yang sama. Pada proses 1 ke 2 terjadi proses pemanasan (*sensible heating*) yang ditunjukkan dengan kenaikan nilai *dry bulb temperature* pada udara pengering. Proses ini ditandai dengan panah biru dan merah pada gambar 2.23, dan panah merah pada gambar 2.24. Sedangkan, pada proses 2 ke 3, terjadi proses humidifikasi (*humidification*) dan pendinginan (*sensible cooling*) yang menyebabkan terjadinya kenaikan *humidity ratio* juga penurunan *dry bulb temperature* pada udara pengering. Proses ini ditandai dengan panah merah dan kuning pada gambar 2.23, dan panah biru pada Gambar 2.24. Karena pada proses 2-3 dalam waktu yang bersamaan udara mengalami proses humidifikasi dan pendinginan, maka garis merah pada Gambar 2.24 menjadi miring dengan gradien tertentu ke kiri atas. Berdasarkan prinsip *psychrometric chart*, diameter dan konfigurasi dari *perforated plate bed* berpengaruh pada peningkatan *humidity ratio* dan penurunan *dry bulb temperature* pada udara pengering. Hal ini dapat terjadi karena semakin kecil *cross sectional area* pada *perforated plate bed*, menyebabkan kecepatan udara pengering yang semakin tinggi.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

D

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Akan dilakukan beberapa tahapan pada penelitian kali ini, dimulai dari mencari permasalahan yang akan diangkat untuk dijadikan penelitian, studi literatur, hingga mendapatkan hasil dan kesimpulan. Adapun hasil yang diinginkan yaitu untuk mengetahui performa konfigurasi *perforated plate* pada *fluidized bed coal dryer* dengan variasi temperatur dan mengetahui karakteristik udara pengering pada *psychrometric chart*. Berikut ialah penjelasan singkat tahapan penelitian kali ini.

3.1.1 Studi Literatur

Langkah awal dalam penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk mendalami landasan teori yang akan digunakan pada penelitian kali ini. Studi literatur dimulai dengan mempelajari jurnal-jurnal penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik yang sejenis, seperti prinsip perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan batubara, prinsip kerja dari *perforated plate fluidized bed coal dryer*, karakteristik udara pada *psychrometric chart*, serta penggunaan *software* GAMBIT 2.4.6 dan ANSYS FLUENT 19.2. Adapun Sumber yang digunakan yaitu literatur seperti buku *heat transfer*, buku CFD, jurnal lokal maupun internasional.

3.1.2 Pemodelan dan Simulasi

Pada tahap ini, dilakukan pemodelan *perforated plate fluidized bed coal dryer* dengan *software* GAMBIT 2.4.6. Terdapat dua pemodelan geometri yang dibuat pada GAMBIT 2.4.6 yaitu *fluidized bed coal dryer* dengan konfigurasi *perforated plate staggered* dan *aligned*. Pada pemodelan ini jumlah lubang dan jarak *pitch* antar lubang sama yaitu 144 lubang dan 0,5 inch. Begitu juga dengan jumlah batubara sebanyak 1.008, yang tersusun sama antara *perforated plate staggered* dan *aligned*. Simulasi dilakukan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2 dengan variasi temperatur udara pengering, yaitu 45°C, 55°C, dan 65°C, terhadap kecepatan 2,4 m/s. Simulasi dilakukan secara *steady state* dengan pengamatan penurunan *moisture content* batubara setiap 1 menit pengeringan.

3.1.3 Pengolahan dan Analisis Data Hasil Simulasi

Tahapan yang dilakukan setelah proses iterasi dan simulasi yaitu pengambilan data hasil simulasi. Data tersebut akan diolah dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik dengan menggunakan *excel*. Data hasil pengolahan antara lain *moisture content*, grafik penurunan *moisture content* terhadap waktu setiap menitnya, serta karakteristik udara pengering yang dapat dilihat dari *psychrometric chart*.

3.1.4 Penulisan Laporan

Semua hasil simulasi dengan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2 dan analisa yang dilakukan akan dituangkan dalam bentuk laporan yang disusun secara sistematis serta menyesuaikan dengan panduan tugas akhir di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

3.2 Pemodelan Geometri dan Simulasi pada GAMBIT 2.4.6 dan ANSYS FLUENT 19.2

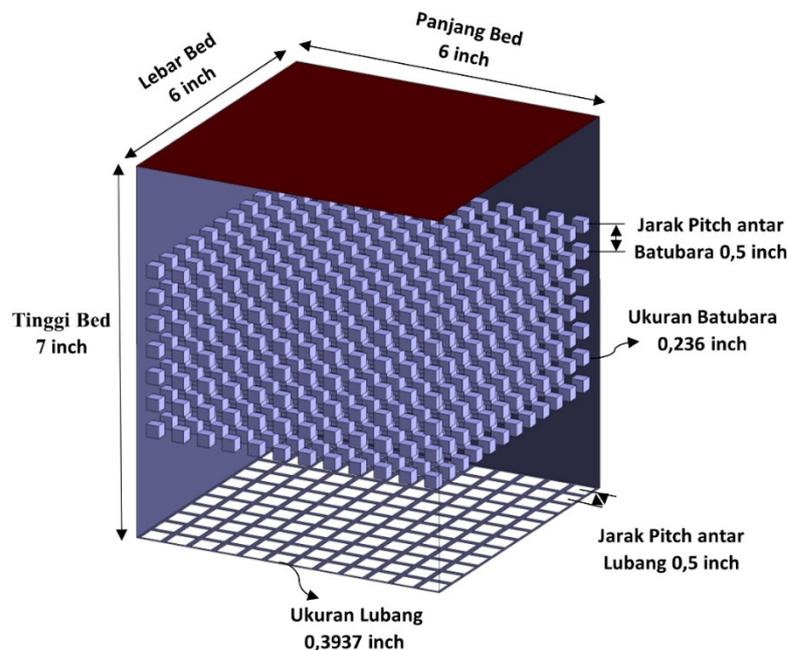
Guna mendefinisikan proses terjadinya perpindahan panas dan massa pada batubara yang terjadi di dalam ruang pengering, maka digunakan suatu metode penelitian berupa metode numerik berbasis komputasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) dengan menggunakan *software* FLUENT 19.2. Pada metode numerik ini, terdapat tiga tahapan diantaranya yaitu *pre-processing*, *solving* atau *processing*, dan yang terakhir yaitu *post-processing*.

3.2.1 Tahap Pre-Processing

Pre-processing yaitu tahapan awal dalam melakukan simulasi pada *software* CFD. Terdapat tiga proses yang dilakukan dengan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6. Proses pertama yang dilakukan pada tahap *pre-processing* yaitu pemodelan geometri, lalu proses kedua yaitu *meshing* pada geometri yang telah dibuat, dan yang terakhir proses ketiga yaitu penentuan *zones* untuk melakukan simulasi pada *software* CFD.

3.2.1.1 Data Geometri

Objek yang diteliti pada penelitian ini adalah *fluidized bed coal dryer*. Data yang diperlukan yaitu data geometri meliputi dimensi dari *coal drying chamber*, dimensi *perforated plate*, dan dimensi batubara. Data geometri digunakan untuk pemodelan geometri yang dilakukan melalui *software* GAMBIT 2.4.6. Data geometri *drying chamber* dan batubara yang digunakan sesuai dengan penelitian berbasis eksperimen yang dilakukan oleh (Levy, 2006) “*Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants*”. Geometri dan data *fluidized bed coal dryer* dapat dilihat pada gambar 3.1 dan tabel 3.1 dibawah ini.

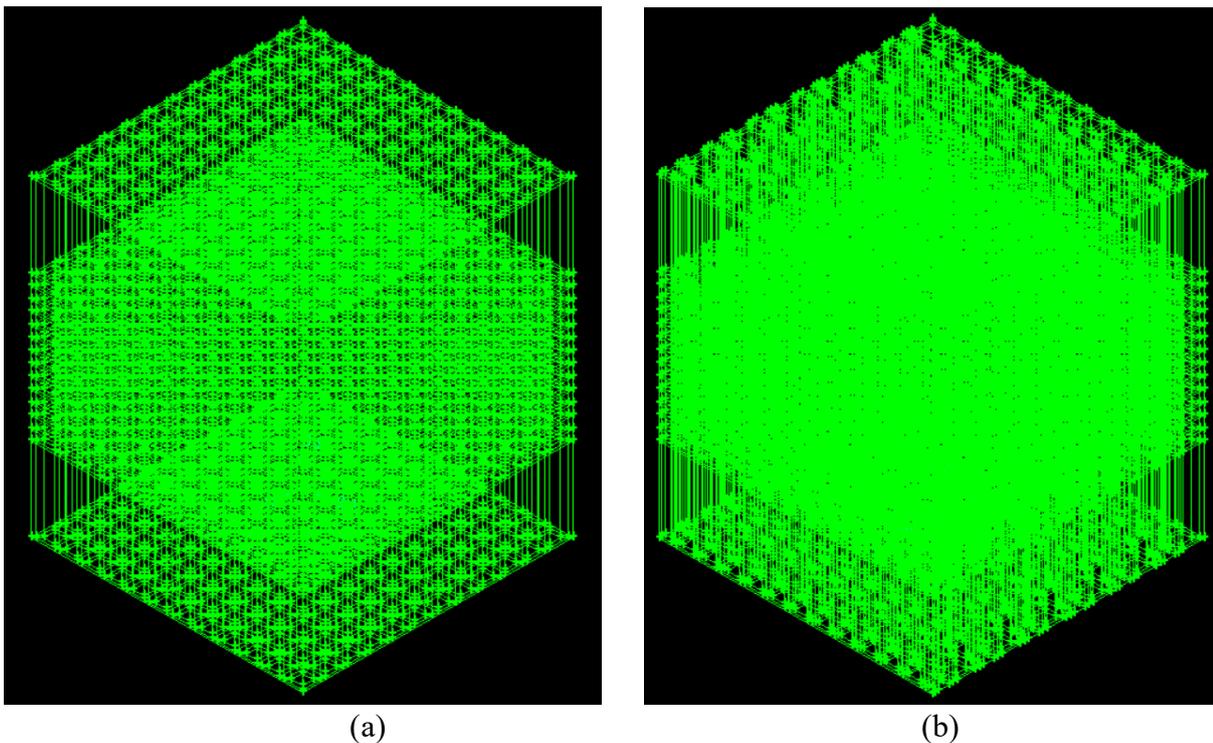


Tabel 3.1 Geometri *Fluidized bed coal dryer*

Geometri <i>Drying chamber</i>			
Parameter	Dimensi		Jumlah
	Inchi	Meter	
Panjang sisi <i>bed</i>	6	0,1524	
Tinggi <i>bed</i>	7	0,1778	
Panjang sisi lubang	0,393701	0,01	
<i>Pitch</i> lubang	0,5	0,0127	
Panjang sisi batubara	0,236	0,006	
Jumlah batubara			

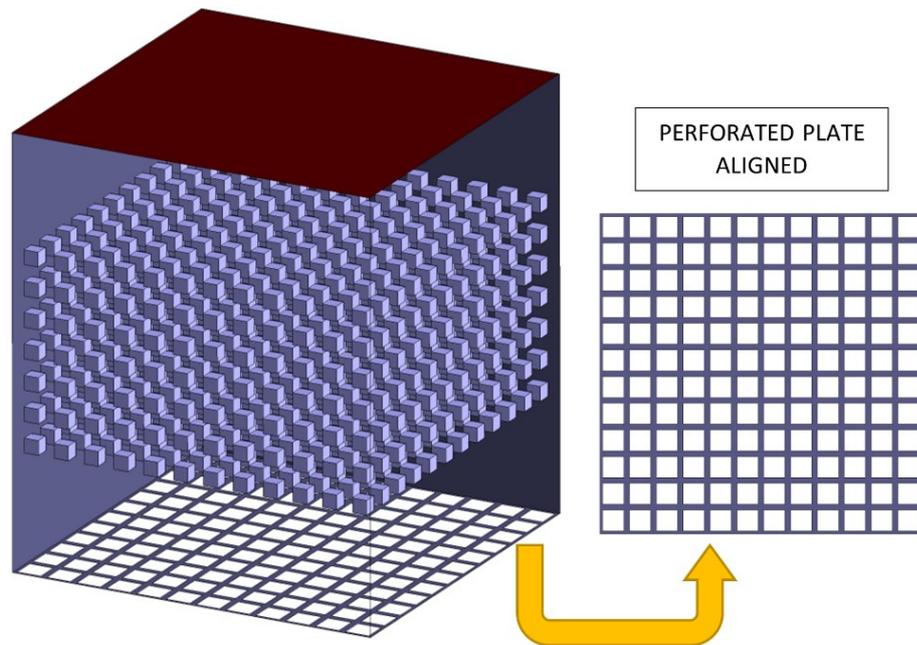
3.2.1.2 Pemodelan Geometri pada GAMBIT 2.4.6

Pada penelitian ini, geometri yang didesain menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6 yaitu geometri *fluidized bed coal dryer* dengan pemodelan 3D. Desain yang akan dibuat mencakup dua bentuk utama, yaitu *fluidized bed coal dryer* dengan konfigurasi *perforated plate* tersusun *staggered* dan *aligned*. Pemodelan geometri *drying chamber* bagian *perforated plate* dibuat berbentuk segiempat, sehingga bentuk dari *drying chamber* itu sendiri adalah berupa balok. Kemudian bentuk *orifice perforated plate* berbentuk persegi. Pemodelan batubara dibuat berbentuk kubus dengan jarak antar *pitch* 0,5 in sebanyak 1.008 buah. Hal ini agar terjadi kesesuaian antara volume dengan massa batubara yang berada di dalam *drying chamber* sebesar 300 gram. Disamping itu, pemodelan batubara berbentuk kubus juga bertujuan agar mempermudah proses *meshing*. Batubara sebagai objek proses pengeringan dimodelkan tersusun secara merata di dalam ruang pengering. Gambar 3.2 menyajikan model 3D dari *coal drying chamber* yang akan diuji, lalu gambar 3.3 menunjukkan perbedaan bentuk konfigurasi *perforated plate* yang tersusun *staggered* dan *aligned*.

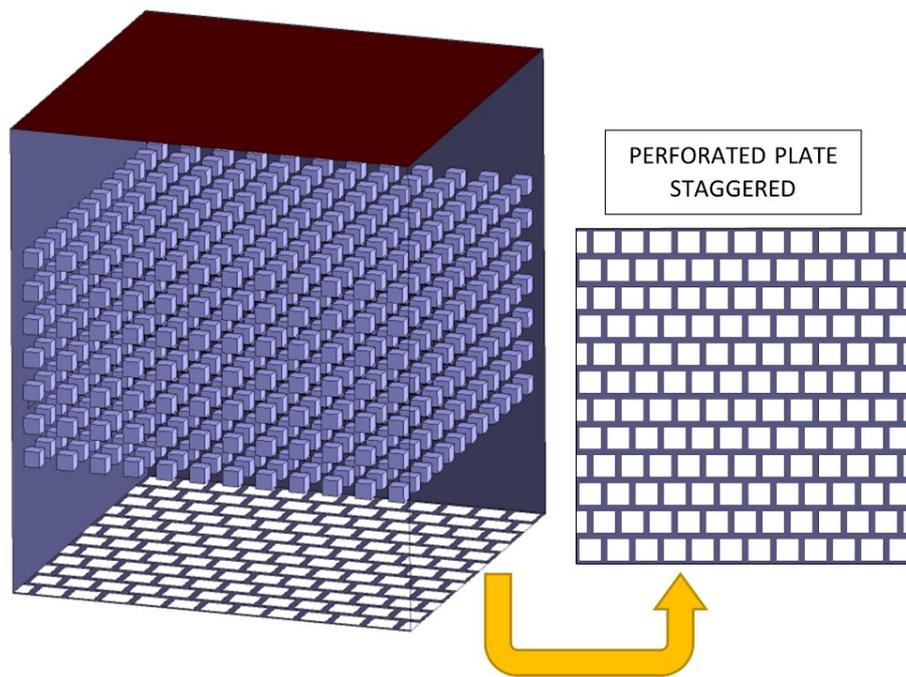


Gambar 3.2 Hasil Pemodelan Geometri Secara Keseluruhan *Fluidized bed coal dryer* pada GAMBIT 2.4.6 (a) *Perforated plate Aligned* (b) *Perforated plate Staggered*

Pada gambar 3.2 menyajikan pemodelan 3D tampak *isometric* dari *fluidized bed coal dryer* yang akan diuji. Untuk gambar bagian a yaitu *fluidized bed coal dryer* dengan *perforated plate* tersusun *aligned* dan untuk yang bagian b yaitu *fluidized bed coal dryer* dengan *perforated plate* tersusun *staggered*. Pemodelan geometri 3D dibuat menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6.



(a)



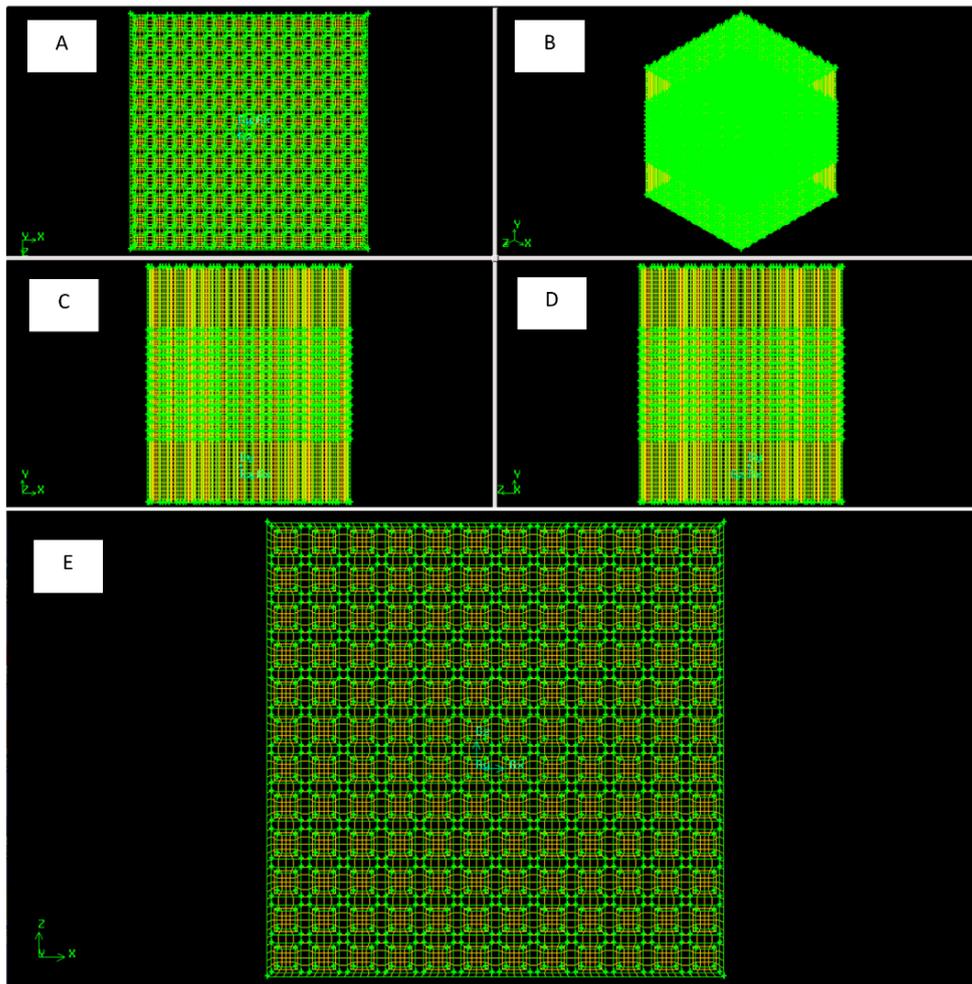
(b)

Gambar 3.3 Perbedaan Bentuk Konfigurasi Perforated Plate Fluidized Bed Coal Dryer (a) Aligned (b) Staggered

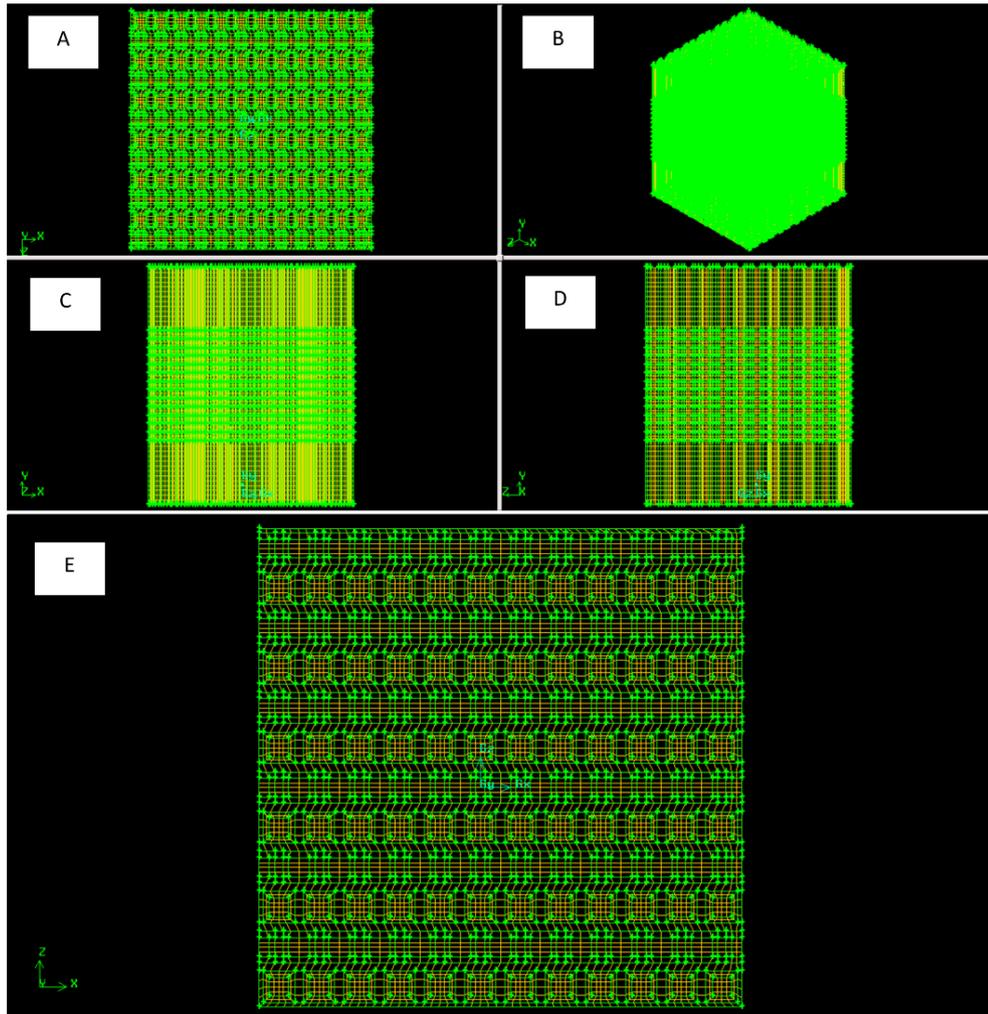
Pada gambar 3.3 menyajikan pemodelan 3D tampak *isometric* dan bagian *perforated plate* dari *fluidized bed coal dryer*. Untuk gambar bagian a yaitu *fluidized bed coal dryer* dengan *perforated plate* tersusun *aligned* dan untuk yang bagian b yaitu *fluidized bed coal dryer* dengan *perforated plate* tersusun *staggered*. Bentuk susunan batubara pada *drying chamber* yaitu sama.

3.1.3.3 Meshing pada GAMBIT 2.4.6

Tahap selanjutnya yaitu *meshing*, proses ini dilakukan setelah pemodelan geometri dibuat menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6. Proses ini bertujuan untuk mendiskretisasi domain aliran. Bidang atau volume yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel - sel kecil (*meshing*) sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang dibutuhkan dapat diaplikasikan ke dalam elemen – elemen kecil tersebut. Jenis *meshing* yang digunakan adalah *structured mesh* dengan bentuk elemen *hexahedral*. Pembuatan *meshing* dibuat lebih rapat pada daerah yang diamati yaitu pada sekitar batubara untuk meningkatkan akurasi dan menghemat waktu komputasi. Proses *meshing* dilakukan dengan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6. Hasil *meshing* dapat dilihat pada gambar 3.4 dan 3.5 dibawah.



Gambar 3.4 Hasil Meshing Fluidized bed coal dryer Konfigurasi Aligned Perforated plate (A) Tampak Atas (B) Tampak Isometric (C) Tampak Samping (D) Tampak Depan (E)Tampak Bawah



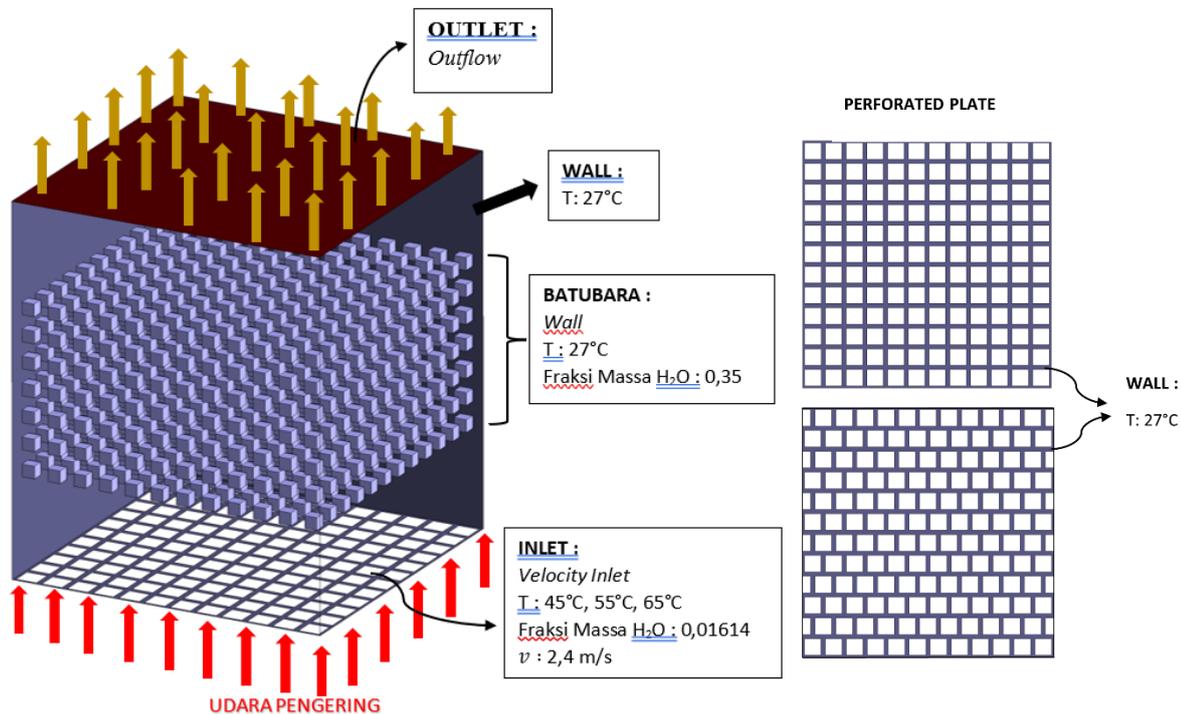
Gambar 3.5 Hasil *Meshing Fluidized bed coal dryer* Konfigurasi *Staggered Perforated plate* (A) Tampak Atas (B) Tampak *Isometric* (C) Tampak Samping (D) Tampak Depan (E)Tampak Bawah

Pada gambar 3.4 diatas ialah hasil *meshing fluidized bed coal dryer* dengan konfigurasi susunan *aligned*. Total *nodes* pada susunan *aligned* yaitu 673.636 *nodes*, lalu untuk total elemen sebanyak 619.238 elemen. *Quality of meshing* untuk *fluidized bed* dengan *perforated plate* susunan *aligned* memiliki *aspect ratio* 4 dan nilai *skewness* sebesar 0,5019. Kemudian, pada gambar 3.5 ialah hasil *meshing fluidized bed coal dryer* dengan konfigurasi susunan *staggered*. Total *nodes* untuk susunan *staggered* yaitu 549.024 *nodes*, lalu untuk total elemen sebanyak 497.462 elemen. *Quality of meshing* untuk *fluidized bed* dengan *perforated plate* susunan *staggered* memiliki *aspect ratio* 3,347 dan nilai *skewness* sebesar 0,684. Hasil *meshing* dikatakan bagus apabila memiliki nilai rentang untuk *skewness* sebesar 0,5 - 0,8, dengan *aspect ratio* kurang dari 5, apabila mendekati 1 semakin ideal nilainya. Sehingga hasil *meshing* pada *fluidized bed coal dryer* dengan konfigurasi susunan *aligned* maupun *staggered* memiliki kualitas dengan kategori bagus.

3.1.3.4 Define Zones pada GAMBIT 2.4.6

Tujuan dari tahapan *define zones* ini untuk menentukan *boundary conditions* yang digunakan pada saat melakukan simulasi. Tahapan ini dilakukan setelah *meshing* menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6. *Define zones* dapat digambarkan seperti pada gambar berikut.

3.2.2 Tahap Processing



Gambar 3.6 Boundary Conditions

Pada tahapan *processing* dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2 yang terdiri dari beberapa tahapan yaitu sebagai berikut.

3.2.2.1 Solver

Adapun tipe *solver* yang digunakan pada simulasi penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.2 Solver FLUENT 19.2

<i>Type</i>	<i>Pressure Based</i>
<i>Velocity Formulation</i>	<i>Absolute</i>
<i>Time</i>	<i>Steady</i>

3.2.2.2 Models

Berdasarkan data pada jurnal referensi yang ada, maka tipe *models* yang akan digunakan yaitu seperti tabel 3.3 dibawah, dengan pengaturan *models* dan sisanya diatur sebagai default. Untuk menyelesaikan perpindahan panas maka model energi perlu diaktifkan. Lalu untuk memodelkan kondisi perpindahan massa yang terjadi pada permukaan batubara yang mengandung fraksi massa H₂O maka digunakan pemodelan *species transport*.

Tabel 3.3 Model FLUENT 19.2

Energy	<i>On</i>
Viscous	<i>Model k-epsilon Realizable, Enhanced Wall Treatment (Thermal Effect)</i>
Species	<i>Species Transport</i>

3.3.2.3 Boundary Conditions

Berdasarkan data yang ada, dibuat model pada *software* seperti gambar 3.6 dengan *boundary conditions* yang diatur seperti pada tabel 3.4 dibawah ini. Pada sisi *inlet*, data yang dimasukkan merupakan kecepatan aliran fluida, sehingga digunakan *velocity inlet*. *Velocity inlet* bernilai konstan seperti pada batasan masalah di bab 1. Pada sisi *outlet* digunakan *outflow* yang menandakan bahwa fluida bebas mengalir keluar tanpa batasan-batasan seperti tekanan, temperatur, ataupun *backflow*. Pada *chamber wall* dan *coal* digunakan *wall* dengan data yang dimasukkan merupakan *thermal* dengan *thermal conditions* berupa temperatur.

Tabel 3.4 *Boundary Conditions* FLUENT 19.2

Parameter	Keterangan
<i>Inlet</i>	Tipe : <i>Velocity inlet</i> Temperatur : 45 °C, 55 °C, 65 °C Fraksi massa H ₂ O : 0,01614 Kecepatan : 2,4 m/s
<i>Outlet</i>	Tipe : <i>Outflow</i>
<i>Chamber wall</i>	Tipe : <i>Wall</i>
<i>Coal</i>	Tipe : <i>Wall</i> Temperatur : 27 °C Fraksi massa H ₂ O : 0,35

Dalam simulasi ini akan menggunakan variasi temperatur *inlet* sebesar 45°C, 55°C, dan 65°C dengan kecepatan *inlet* konstan sebesar 2,4 m/s, serta variasi konfigurasi *perforated plate* berupa *staggered* dan *aligned*. Dengan variasi tersebut, diharapkan dapat memperlihatkan grafik *moisture content* terhadap waktu pengeringan yang menunjukkan karakteristik sebuah proses pengeringan. Saat kondisi sebelum masuk *drying chamber*, udara pengering yang disuplai menuju *drying chamber* disesuaikan dengan kondisi udara di Indonesia dengan temperatur 27 °C dan kelembaban relatif 73%. Adapun data-data di atas didapatkan dengan proses perhitungan sebagai berikut.

a. Temperatur Udara Pengering

Variasi temperatur yang digunakan pada penelitian ini didasarkan pada eksperimen yang telah dilakukan oleh **Edward K. Levi dkk (2006)** yaitu menggunakan rentang temperatur sebesar 43-66 °C. Sehingga pada penelitian kali ini juga digunakan temperatur dimulai dengan 45°C hingga 65°C dengan kenaikan setiap 10°C.

Selain itu, perlu diketahui bahwa terdapat batasan temperatur maksimum yang dapat digunakan. Hal ini dikarenakan proses pengeringan berakibat pada penguapan kandungan air dan *volatile matter*. *Volatile matter* yaitu komponen batubara yang memiliki nilai kalor yang tidak diinginkan penguapannya. Sehingga melihat hal tersebut perlu diketahui besar temperatur yang dibutuhkan untuk proses pengeringan batubara. Hal ini diketahui berdasarkan karakteristik komponen massa pembentuk batubara. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Hardianto, 2012) sesuai dengan ASTM D 7348, dengan karakteristik batubara yang

hampir sama menyatakan bahwa pada temperatur 150°C penguapan kandungan air batubara sudah selesai sedangkan *volatile matter* belum mulai menguap.

b. Perhitungan Kecepatan minimum fluidisasi

$$\begin{aligned} Ar &= \frac{\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \\ &= \frac{1,04 \text{ kg/m}^3 (0,006 \text{ m})^3 (1400 - 1,04) \text{ kg/m}^3 9,8 \text{ m/s}^2}{(1,854 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s})^2} \\ &= 9,855 \times 10^6 \end{aligned}$$

Setelah menghitung *Archimedes number*, *Reynolds number* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} Re_{mf} &= \sqrt{(33,7^2 + 0,0408Ar)^2 - 33,7} \\ &= \sqrt{[33,7^2 + 0,0408(9,855 \times 10^6)]^2 - 33,7} \\ &= 601,296 \end{aligned}$$

Sehingga kecepatan minimum fluidisasi dapat dicari dari persamaan *Reynolds number* berikut.

$$\begin{aligned} Re_{mf} &= \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu} \\ u_{mf} &= \frac{601,296 (1,854 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s})}{1,04 \text{ kg/m}^3 \times 0,006 \text{ m}} \\ &= 1,6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

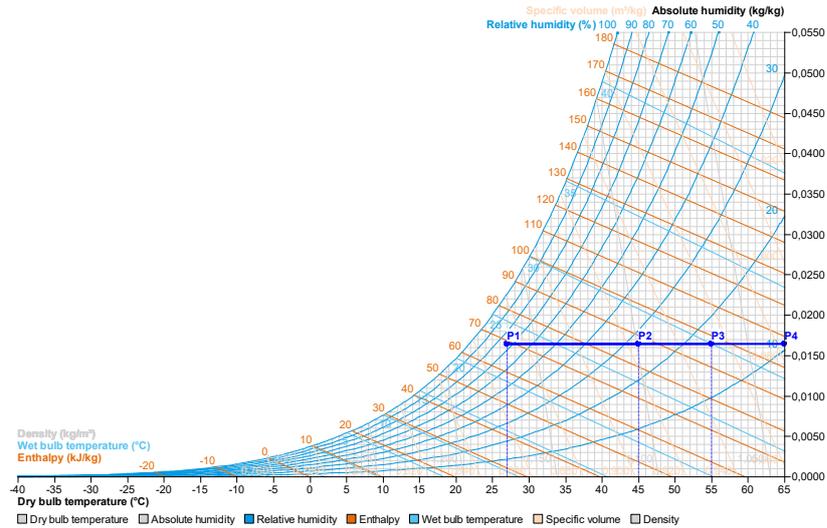
Selain itu, juga perlu diketahui kecepatan maksimum yang dapat digunakan untuk memastikan batubara tetap berada di dalam *drying chamber* dengan menggunakan persamaan 2.5.

$$\begin{aligned} u_t &= d_p \left(\frac{1,78 \times 10^{-2} [g(\rho_p - \rho_g)]^2}{\rho_g \mu} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &= 0,006 \text{ m} \left(\frac{1,78 \times 10^{-2} [9,8 \text{ m/s}^2 (1400 - 1,04) \text{ kg/m}^3]^2}{1,04 \text{ kg/m}^3 \times 1,854 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &= 32 \text{ m/s} \end{aligned}$$

c. Fraksi massa H₂O pada *inlet*

Dalam penentuan *boundary condition* dengan tipe *velocity inlet*, maka dilakukan pengaturan untuk fluida masuk. Dimana pada bagian ini, akan ditentukan kecepatan, temperatur dan RH fluida. RH pada fluida diperoleh melalui RH meter berdasarkan hasil eksperimen, namun untuk memasukkan ke dalam *Fluent* harus dihitung dalam bentuk fraksi massa H₂O. Adapun kondisi udara pengering yang disuplai menuju *drying chamber* disesuaikan dengan kondisi udara di wilayah Surabaya dengan temperatur 27°C dan kelembaban relatif 73%

(BMKG Republik Indonesia). Untuk mencari fraksi massa H₂O *inlet* maka diperlukan *psychrometric chart*.



Gambar 3.7 Penentuan *Inlet* Fraksi Massa H₂O

Pada kondisi udara dengan temperatur 27°C dan RH 73% diperoleh hasil *humidity ratio* dari *psychrometric chart* sebesar 0,0164 kg H₂O/kg dry air, kemudian pada *inlet* ruang pengering telah diatur temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Pada titik pertama ditarik garis lurus mendatar ke kanan (udara dipanaskan dari 27°C - 45°C) sampai titik 45°C, didapat nilai *humidity ratio* tetap sebesar 0,0164 kg H₂O/kg dry air tetapi RH udara menurun menjadi 27,14%. Selanjutnya berlaku juga pada temperatur 55°C dan 65°C, dimana titik pertama ditarik garis lurus mendatar ke kanan (udara dipanaskan dari 27°C - 55°C dan 27°C - 65°C) sampai pada titik 55°C dan 65°C, didapatkan *humidity ratio* tetap 0,0164 namun terjadi penurunan RH udara pada 55°C menjadi 16,55%, dan pada temperatur 65 °C memiliki RH 10,43%.

Untuk memperoleh fraksi massa H₂O pada *inlet* dapat menggunakan persamaan 2.22.

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

Sedangkan pada persamaan rasio kelembapan di 2.21

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_{dry \text{ air}}}$$

$$m_{H_2O} = \omega \times m_{dry \text{ air}}$$

Lalu substitusikan persamaan 2.22 ke dalam persamaan 2.21

$$\begin{aligned} Y_{H_2O \text{ inlet}} &= \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{dry \text{ air}}} \\ &= \frac{\omega \times m_{dry \text{ air}}}{(\omega \times m_{dry \text{ air}}) + m_{dry \text{ air}}} \\ &= \frac{\omega}{\omega + 1} \\ &= \frac{0,0164}{0,0164 + 1} \\ &= 0,01614 \end{aligned}$$

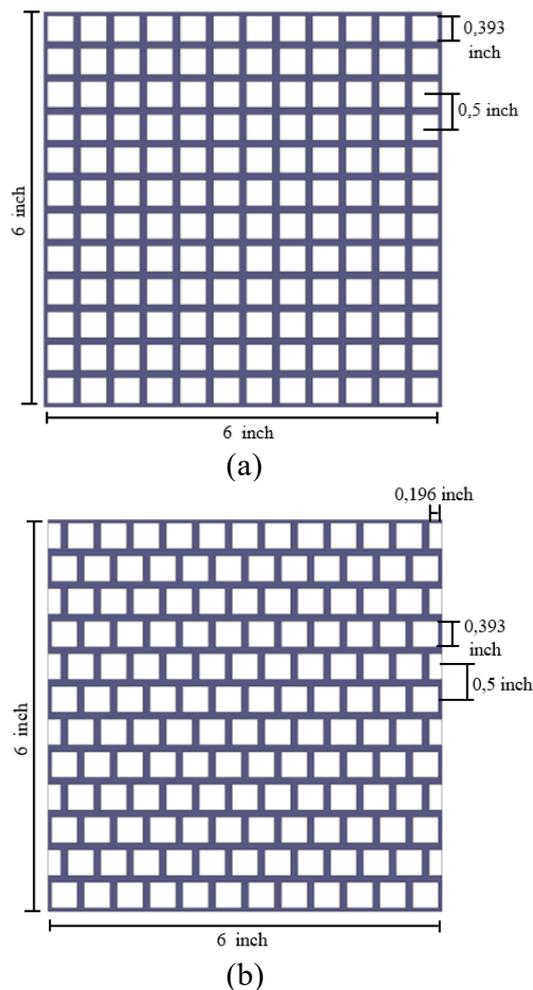
d. Perhitungan *Flow Open Area Perforated Plate*

Laju massa aliran udara merupakan banyaknya massa udara per satuan waktu yang mengalir ke dalam *drying chamber*. Besarnya nilai laju massa aliran udara didapatkan berdasarkan besarnya kecepatan aliran udara, massa jenis udara, dan luasan *flow open area* pada *perforated plate*.

Untuk mendapatkan nilai laju massa aliran udara, perlu dihitung terlebih dahulu luasan *flow open area* pada *perforated plate* dan kecepatan minimum fluidisasi yang digunakan sebagai batas kecepatan yang akan digunakan. Perhitungan laju massa aliran udara untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* ditunjukkan sebagai berikut:

- *Flow Open Area* pada *Perforated Plate*

Konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* yang digunakan pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.8, luasan *flow open area* pada *plate* adalah jumlah luasan lubang *orifice* yang dilewati udara pengering.



Gambar 3.8 (a) Dimensi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* (b) Dimensi Konfigurasi *Perforated Plate Staggered*

Dengan mengetahui besarnya nilai panjang sisi *perforated plate* maka nilai dari *flow open area* adalah sebagai berikut :

- Luasan *Open Area* Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*

Jumlah *orifice* = 144 buah

$$A_{\text{flow open aligned}} = S \times S \times n_{\text{orifice}}$$

$$A_{\text{flow open aligned}} = (0,393 \times 0,393 \times 144) \text{ inch}$$

$$A_{\text{flow open aligned}} = (10 \times 10 \times 144) \text{ mm}$$

$$A_{\text{flow open aligned}} = 14400 \text{ mm}$$

- Luasan *Open Area* Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*

Jumlah *orifice* = 150 buah

$$A_{\text{flow open aligned}} = s \times s \times n_{\text{orifice}}$$

$$A_{\text{flow open aligned}} = ((0,196 \times 0,393 \times 12) + (0,393 \times 0,393 \times 138)) \text{ inch}$$

$$A_{\text{flow open aligned}} = ((5 \times 10 \times 12) + (10 \times 10 \times 138)) \text{ mm}$$

$$A_{\text{flow open aligned}} = 14400 \text{ mm}$$

Dari kedua perhitungan didapatkan nilai luasan *flow open area* pada konfigurasi *aligned perforated plate* sama dengan luasan *flow open area* pada konfigurasi *staggered perforated plate*.

- e. Menghitung Massa *Dry Air* yang Masuk ke *Drying Chamber*

- Menghitung *Volume Flowrate*

$$Q = v \times A_{\text{flow open area}}$$

$$Q = 2,4 \text{ m/s} \times (0,0144) \text{ m}^2$$

$$Q = 0,03456 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Menghitung *Mass Flowrate*

$$\dot{m} = \rho_{\text{udara}} \times Q$$

$$\dot{m} = 1,04 \text{ kg/m}^3 \times 0,03456 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = 0,0359424 \text{ kg/s}$$

Massa *dry air* yang masuk *drying chamber* selama 60s

$$m_{\text{dry air}} = \dot{m} \times t$$

$$m_{\text{dry air}} = 0,0359424 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 60\text{s}$$

$$m_{\text{dry air}} = 2,156544 \text{ kg}$$

- f. Menghitung Massa Batubara di Dalam *Drying Chamber*

$$m = V_{\text{batubara}} \times \rho_{\text{batubara}} \times n$$

$$m = (0,006^3) \text{ m}^3 \times 1400 \text{ kg/m}^3 \times 1008$$

$$m = 300 \text{ gram}$$

- f. Fraksi massa H₂O pada dinding batubara

Untuk memperoleh fraksi massa H₂O pada dinding batubara dapat menggunakan persamaan berikut.

$$m_{\text{f}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_x}$$

Dimana $m_{\text{sampel}} = m_{\text{H}_2\text{O}} + m_x$ yang merupakan berat keseluruhan batubara, sehingga kandungan fraksi massa sama dengan nilai *moisture content*, yaitu 0,35 atau 35%.

3.3.2.4 Solution Methods

Pemilihan *solution methods* yang tepat akan menghindari simulasi dari *warning* dan *error*, hal ini juga akan meningkatkan akurasi dari hasil simulasi. Pada *solution methods* simulasi penelitian ini kali ini digunakan *second order solution*. Hal ini dikarenakan *second*

order solution dapat menambah akurasi iterasi dibandingkan dengan *first order solution*. *Solution methods* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.5.

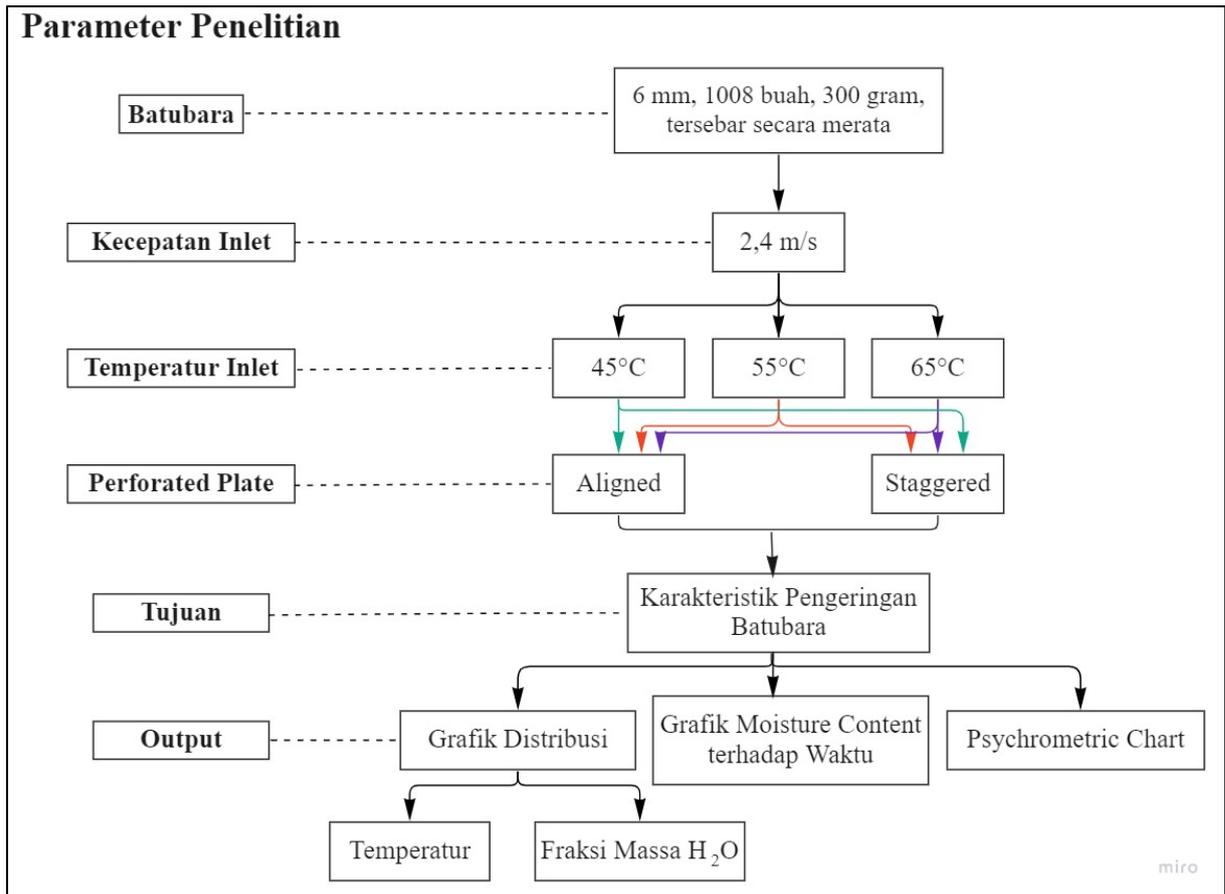
<i>Pressure-Velocity Coupling Scheme</i>	SIMPLE
<i>Spatial Discretization</i>	
- <i>Gradient</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>
- <i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
- <i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
- <i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
- <i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>
- <i>Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
- <i>H₂O</i>	<i>Second Order Upwind</i>

Tabel 3.5 *Solution Methods* FLUENT 19.2

3.2.3 Tahap *Post-Processing*

Tahapan yang akan dilakukan setelah proses iterasi dan simulasi yaitu pengambilan data hasil simulasi. Hasil data simulasi secara kualitatif berupa kontur temperatur dan kontur fraksi massa H₂O dalam *drying chamber* dengan *perforated plate* yang tersusun secara *staggered* dan *aligned*. Data kualitatif ini nantinya akan dianalisa untuk melihat karakteristik pengeringannya. Pada penelitian ini data-data yang diperoleh berupa fraksi massa H₂O *outlet*, temperatur (T), koefisien konveksi (h), koefisien difusi massa (D_{AB}), konduktivitas panas fluida (k), massa jenis (ρ) dan panas spesifik (c_p). Data-data ini diolah dengan *software excel* untuk mendapatkan laju pengeringan batubara dan perubahan *moisture content* terhadap waktu.

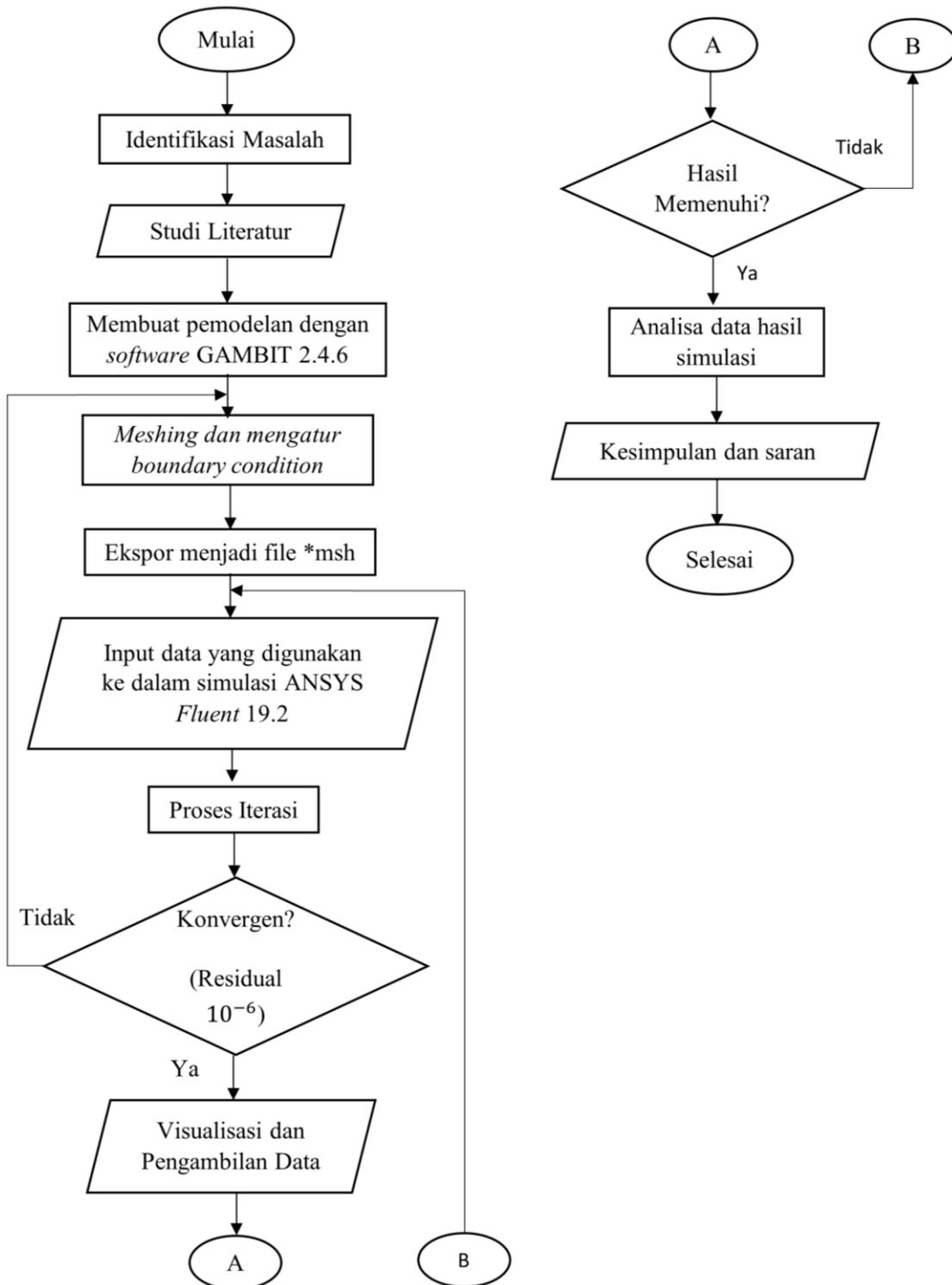
3.3 Kerangka Penelitian



Gambar 3.9 Kerangka Penelitian

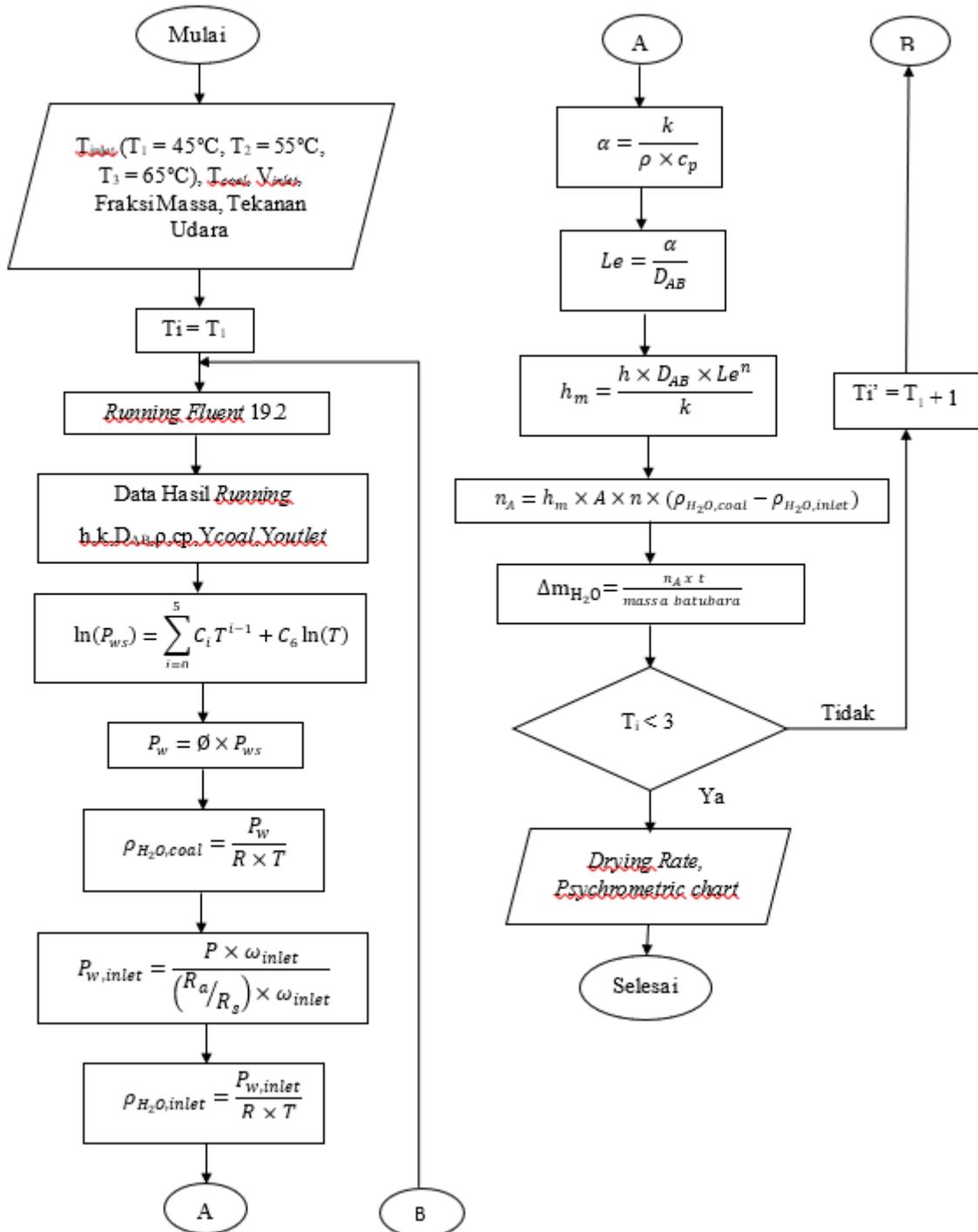
3.4 Flowchart Penelitian

3.4.1 Flowchart Metode Penelitian



Gambar 3.10 Flowchart Metode Penelitian

3.4.2 Flowchart Perhitungan



Gambar 3. 11 Flowchart Perhitungan

3.5 Timeline Penelitian

Tabel 3.6 Timeline Penelitian

No.	Kegiatan	Bulan																															
		Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Penentuan Topik																																
2	Studi Literatur																																
3	Konsultasi kepada Pembimbing																																
3	Pembuatan Geometri dan Meshing																																
3	Simulasi																																
4	Penulisan Proposal TA																																
5	Analisa Hasil Simulasi																																
6	Seminar Proposal																																
7	Penulisan TA																																
8	Sidang Tugas Akhir																																

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

Data hasil penelitian yang didapatkan dari simulasi pengeringan batubara melalui *software* ANSYS FLUENT 19.2 ini adalah temperatur batubara, temperatur *outlet* udara pengering, fraksi massa H₂O *outlet*, koefisien konveksi (h), koefisien difusi massa (D_{AB}), konduktivitas panas fluida (k), massa jenis (ρ) dan panas spesifik (c_p). Data hasil simulasi secara lengkap terlampir pada lampiran tabel 2.1.

4.2 Contoh Perhitungan

Pada *software* ANSYS FLUENT 19.2 dilakukan simulasi proses pengeringan dengan variasi temperatur udara pengering sebesar 45°C, 55°C, dan 65°C serta kecepatan konstan sebesar 2,4 m/s yang kemudian didapatkan 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. Adapun data yang digunakan sebagai contoh perhitungan merupakan data hasil simulasi *fluidized bed* dengan konfigurasi *aligned perforated plate*. Berikut adalah data yang digunakan dalam proses perhitungan *moisture content*.

- Temperatur *inlet* = 65°C
- Kecepatan *inlet* = 2,4 m/s
- Fraksi massa H₂O *inlet* = 0,01614
- Humidity ratio *inlet* = 0,0164
- Temperatur batubara = 27°C
- Moisture content batubara = 0,35
- Tekanan *drying chamber* = 101325 Pa
- Konstanta Gas Ideal Uap Air = 461,5 J/kg. °K

4.2.1 Perhitungan Densitas H₂O pada Permukaan Batubara

- a. Tekanan Parsial H₂O pada Permukaan Batubara

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

Diketahui:

- C₀ = -5,8002206 x 10³
- C₁ = 1,3914993
- C₂ = -4,8640239 x 10⁻²
- C₃ = 4,1764768 x 10⁻⁵
- C₄ = -1,4452093 x 10⁻⁸
- C₅ = 0
- C₆ = 6,5459673

Dengan temperatur permukaan batubara 27°C maka didapatkan:

$$\begin{aligned}\ln(P_{ws}) &= 8,1707 \\ P_{ws} &= \exp(8,1707) \\ &= 3535,866 \text{ Pa}\end{aligned}$$

- b. Tekanan Uap Air

$$\begin{aligned}P_w &= \emptyset \times P_{ws} \\ &= 1 \times 3535,866 \\ &= 3535,866 \text{ Pa}\end{aligned}$$

c. Densitas H₂O pada Permukaan Batubara

$$\begin{aligned}\rho_{\text{H}_2\text{O,coal}} &= \frac{P_w}{R \times T} \\ &= \frac{3535,866 \text{ Pa}}{461,5 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K} \times 300 \text{ }^\circ\text{K}} \\ &= 0,0255 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

4.2.2 Perhitungan Densitas H₂O pada Udara *Inlet*

a. Tekanan Udara *Inlet*

$$P_{w,\text{inlet}} = \frac{P \times \omega_{\text{inlet}}}{\left(\frac{R_a}{R_s}\right) + \omega_{\text{inlet}}}$$

Dimana : R_a = tetapan gas untuk udara kering sebesar 287 J/kg.°K

R_s = tetapan gas untuk uap air sebesar 461.5 J/kg.°K

P = tekanan udara pengering

$$\begin{aligned}P_{w,\text{inlet}} &= \frac{P \times \omega_{\text{inlet}}}{\left(\frac{R_a}{R_s}\right) + \omega_{\text{inlet}}} \\ &= \frac{101325 \times 0,0164}{\left(\frac{287}{461,5}\right) + 0,0164} \\ &= \frac{101325 \times 0,0164}{0,62198 + 0,0164} \\ &= 2603,042 \text{ Pa}\end{aligned}$$

b. Densitas H₂O pada Udara *Inlet*

$$\begin{aligned}\rho_{\text{H}_2\text{O,coal}} &= \frac{P_w}{R \times T} \\ &= \frac{2603,042 \text{ Pa}}{461,5 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K} \times 338 \text{ }^\circ\text{K}} \\ &= 0,01669 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

4.2.3 Perhitungan Setelah *Running Fluent*

Setelah melakukan proses iterasi *software* ANSYS FLUENT 19.2 dengan *boundary condition* yang telah ditentukan pada Bab III, maka didapatkan data-data sebagai berikut.

- Koefisien konveksi (h) = 109,98901 W/m².°K
- Konduktivitas termal (k) = 0,0454 W/m.°K
- Densitas (ρ_{coal}) = 0,99499361 kg/m³
- *Specific heat* (c_{p,coal}) = 1112,4933 J/kg.°K
- *Binary mass diffusivity* (D_{AB}) = 2,88 x 10⁻⁵ m²/s
- Fraksi massa (Y_{H₂O,outlet}) = 0,020184 kg H₂O/ kg air

a. *Thermal diffusivity* (α)

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{k}{\rho \times c_p} \\ &= \frac{0,0454 \text{ W/m.K}}{0,99499361 \text{ kg/m}^3 \times 1112,4933 \text{ J/kg.K}}\end{aligned}$$

$$= 4,101 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

b. *Lewis Number*

$$\begin{aligned} \text{Le} &= \frac{\alpha}{D_{AB}} \\ &= \frac{4,101 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{2,88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \\ &= 1,424117 \end{aligned}$$

c. Koefisien Perpindahan Massa Secara Konveksi (h_m)

$$\begin{aligned} h_m &= \frac{h \times D_{AB} \times \text{Le}^n}{k} \\ &= \frac{109,98901 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \times 2,88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \times 1,424117^{1/3}}{0,454 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}} \\ &= 0,0785 \text{ m}/\text{s} \end{aligned}$$

d. Laju Perpindahan Massa (n_A)

$$\begin{aligned} n_A &= h_m \times A \times n \times (\rho_{\text{H}_2\text{O,coal}} - \rho_{\text{H}_2\text{O,inlet}}) \\ &= 0,0785 \text{ m}/\text{s} \times (6 \times 0,006^2) \times 1008 \times (0,0255 - 0,01699) \text{ kg}/\text{m}^3 \\ &= 0,000695 \text{ kg}/\text{s} \end{aligned}$$

e. *Moisture Content Akhir*

Dengan interval waktu pengeringan selama 1 menit, maka:

$$\begin{aligned} \Delta \text{MC} &= \frac{n_A \times t}{m_{\text{batubara}}} \\ &= \frac{0,000695 \text{ kg}/\text{s} \times 60 \text{ s}}{0,3 \text{ kg}} \\ &= 0,0302568 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MC}_{\text{batubara setelah 60 s}} &= \text{MC}_{\text{batubara awal}} - \Delta \text{MC} \\ &= 0,35 - 0,0302568 \\ &= 0,3197432 \\ &= \mathbf{31,97 \%} \end{aligned}$$

4.2.4 *Boundary Condition untuk Running Selanjutnya*

Untuk melakukan running selanjutnya, digunakan temperatur dan fraksi massa H₂O batubara yang terukur dari proses sebelumnya pada *software* ANSYS FLUENT 19.2 dan selanjutnya dilakukan iterasi untuk menghasilkan data-data seperti yang didapatkan dari hasil running sebelumnya. Data-data baru yang didapatkan tersebut diolah lagi untuk mendapatkan besarnya penurunan *moisture content* batubara. Running dilakukan secara bertahap hingga nilai fraksi massa H₂O pada batubara terakhir hampir sama atau tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan fraksi massa H₂O dari data sebelumnya.

4.2.5 *Perhitungan Validasi*

a. Berdasarkan *Psychrometric Chart*

Setelah melakukan simulasi menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2 dengan *boundary condition* yang sudah ditentukan, didapatkan data temperatur pada *outlet* sebesar 327,464°K = 54,464°C. Lalu menggunakan *psychrometric chart* dengan temperatur 54,464°C didapatkan $\omega_{\text{outlet}} = 0,0206 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg dry air}$. Dari data tersebut dapat dilakukan perhitungan validasi yaitu *mass balance* dimana massa uap air yang diterima oleh udara pengering sama dengan massa uap air yang dilepas oleh batubara. Data hasil validasi dan perhitungan error secara lengkap terlampir pada tabel 4.1.

$$\begin{aligned} \text{Massa H}_2\text{O yang diterima udara pengering} &= \text{Massa H}_2\text{O yang dilepas batubara} \\ m_{\text{dry air } 60s} \times (\omega_{\text{outlet}} - \omega_{\text{inlet}}) &= m_{\text{batubara}} \times (MC_{,0} - MC_{,1}) \\ 2,15 \text{ kg dry air} \times (0,0206 - 0,0164) \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg dry air}} &= 0,3 \text{ kg} \times (0,35 - 0,3197432) \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg batubara}} \\ 2,15 \text{ kg dry air} \times 0,0042 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg dry air}} &= 0,3 \text{ kg} \times 0,0302568 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg batubara}} \\ 0,00903 \text{ kg H}_2\text{O} &= 0,009077 \text{ kg H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Persentase *error*

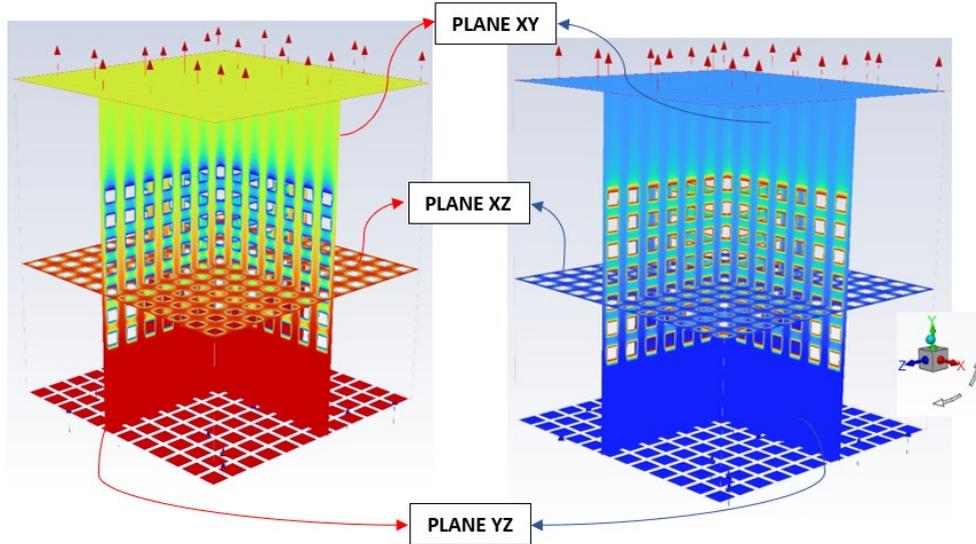
$$\begin{aligned} \%Error &= \frac{\text{massa H}_2\text{O yang dilepas oleh batubara} - \text{massa H}_2\text{O yang diterima oleh udara pengering}}{\text{massa H}_2\text{O yang diterima oleh udara pengering}} \times 100 \% \\ &= \frac{0,009077 - 0,00903}{0,00903} \times 100 \% \\ &= 0,52 \% \end{aligned}$$

Tabel 4.1 Validasi Berdasarkan *Psychrometric Chart* dan Perhitungan

<i>Konfigurasi Perforated Plate</i>	<i>T inlet</i>	<i>m H2O diterima</i>	<i>m H2O dilepas</i>	<i>Error</i>
	°C	kg	kg	%
<i>Aligned</i>	45	0,00430	0,00465	8,067
	55	0,00667	0,00702	5,289
	65	0,00903	0,00908	0,521
<i>Staggered</i>	45	0,00409	0,00444	8,638
	55	0,00645	0,00670	3,829
	65	0,00860	0,00868	0,937

4.3 Analisa Kontur

Dilakukan pengambilan data secara kualitatif berupa kontur temperatur dan fraksi massa H₂O. Untuk posisi pengambilan dilakukan pada potongan bidang tertentu agar mendapatkan kontur yang diinginkan, dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini.

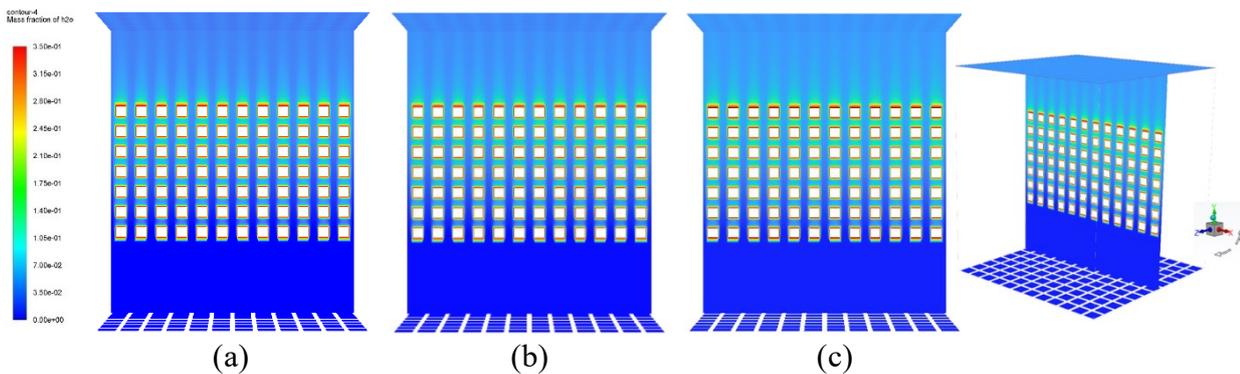


Gambar 4.1 Posisi Pengambilan Bidang Kontur Temperatur dan Fraksi Massa H₂O

4.3.1 Analisa Kontur Fraksi Massa H₂O

4.3.1.1 Analisa Kontur Fraksi Massa H₂O dengan Variasi Temperatur

a. Pada Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*



Gambar 4.2 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang XY Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Dari gambar 4.2 di atas diperoleh kontur fraksi massa H₂O bidang XY pada konfigurasi *perforated plate aligned* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Pada kontur tersebut terlihat memiliki perbedaan pada bagian *outlet*. Pada bagian sisi *outlet* temperatur 65°C memiliki warna yang cenderung lebih muda dibanding sisi *outlet drying chamber* temperatur 45°C. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan jumlah kandungan fraksi massa H₂O pada variasi temperatur tersebut. Dari ketiga kontur fraksi massa H₂O tersebut menunjukkan bahwa kandungan air pada sisi *outlet* lebih tinggi dibandingkan daerah sisi *inlet*. Ditunjukkan dengan adanya perubahan warna dari biru tua menjadi biru muda yang mengartikan terjadinya perubahan fraksi massa H₂O selama proses pengeringan di dalam *drying chamber*. Hal ini dikarenakan saat udara pengering masuk *drying chamber* dan melewati batubara, maka kandungan air di dalam batubara terbawa oleh udara pengering menuju ke *outlet* sehingga udara pengering mengalami peningkatan kandungan air atau jumlah fraksi massa H₂O.

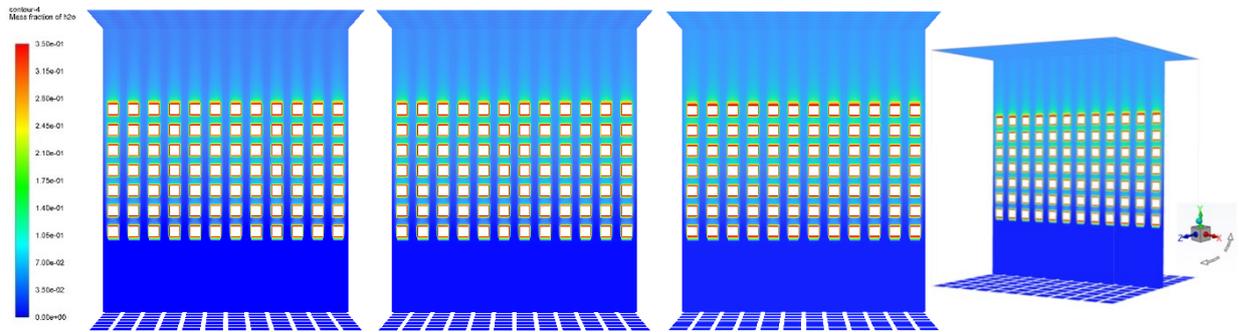
Secara teoritis terdapat hubungan antara temperatur udara pengering dengan laju perpindahan massa H₂O pada batubara yang diterangkan dalam persamaan perpindahan panas.

$$Q = h \times A \times (T_{udara} - T_{coal})$$

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

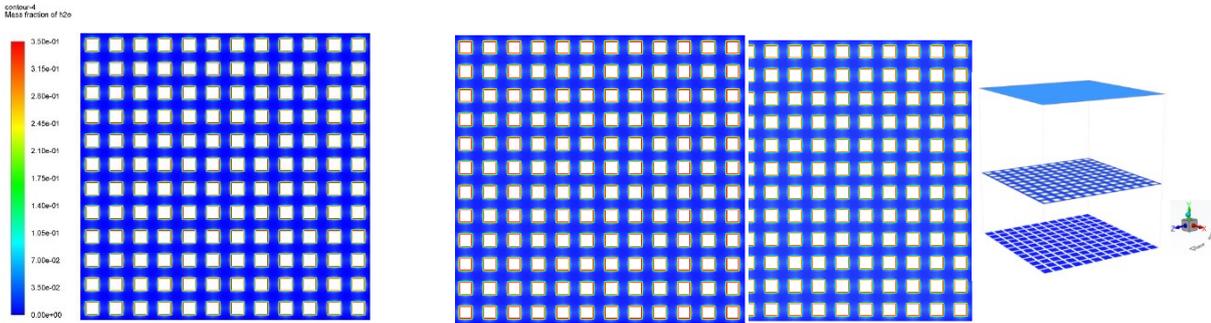
Dalam persamaan tersebut, didapatkan bahwa semakin tinggi nilai delta temperatur, maka akan diikuti dengan naiknya proses perpindahan panas. Apabila nilai perpindahan panas meningkat, maka mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas menjadi meningkat pula dikarenakan berbanding lurus. Semakin tinggi nilai koefisien perpindahan panas, maka mengakibatkan laju perpindahan massa air dari batubara menuju udara pengering semakin tinggi dikarenakan naiknya koefisien perpindahan massa.

Disamping itu, semakin tinggi temperatur udara pengering maka akan semakin menurunkan nilai *relative humidity* pada udara pengering dan kapasitas kandungan uap air dalam udara akan semakin besar. *Relative humidity* yang rendah akan menyebabkan *transfer* panas dan massa dari batubara ke udara semakin besar dan energi panas dalam udara pengering mampu menguapkan molekul-molekul air yang ada pada permukaan batubara. Oleh karena itu, pada temperatur 65°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O tertinggi dan temperatur 45°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O terendah, yang berarti temperatur 65°C memiliki kemampuan penguapan volume H₂O batubara yang lebih baik dibandingkan temperatur 45°C.



Gambar 4.3 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang YZ Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

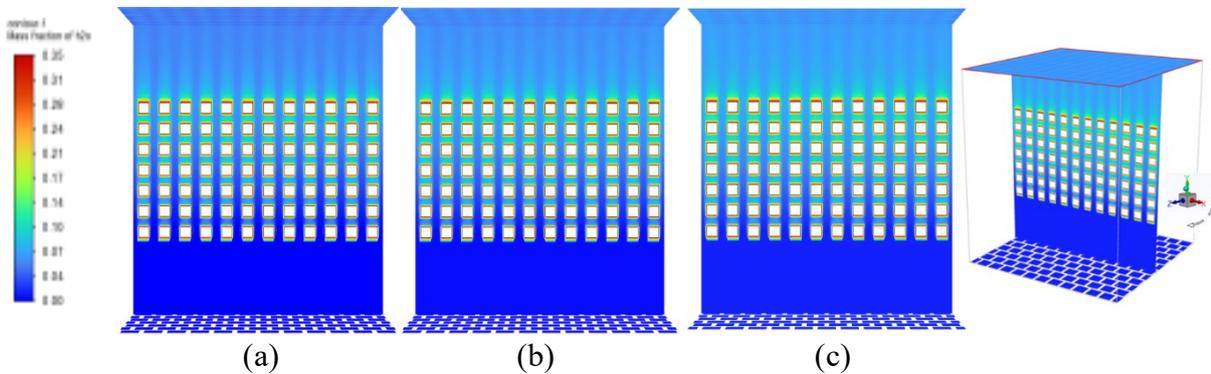
Pada gambar 4.3 diatas merupakan kontur fraksi massa H₂O bidang YZ pada konfigurasi *perforated plate aligned* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Seperti halnya pada *plane XY*, pada kontur tersebut terlihat memiliki perbedaan pada bagian *outlet* dan *inlet*. Saat udara memasuki *drying chamber* kontur berwarna biru tua yang menandakan bahwa kandungan air masih rendah sedangkan pada sisi *outlet drying chamber* kontur fraksi massa H₂O berwarna lebih muda dibandingkan warna sekitar *inlet*, yang mengartikan jumlah kandungan air atau fraksi massa H₂O udara pengering pada sisi *outlet* relatif lebih banyak dibandingkan fraksi massa H₂O udara pengering pada sisi *inlet*. Terjadinya peningkatan jumlah kandungan H₂O pada udara pengering merupakan fenomena proses pengeringan, pada proses pengeringan ini juga terjadi proses penurunan *moisture content* pada batubara.



Gambar 4.4 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang XZ Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Kemudian pada gambar 4.4 diatas merupakan kontur fraksi massa H₂O bidang XZ pada konfigurasi *perforated plate aligned* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Pada ketiga kontur tersebut memiliki perbedaan yang tidak signifikan, dapat dilihat bahwa pada temperatur 65°C berwarna biru yang lebih muda dibanding temperatur 45°C, hal ini mengartikan temperatur 65°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O tertinggi dan temperatur 45°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O terendah. Hal ini berarti temperatur 65°C memiliki kemampuan penguapan volume H₂O batubara yang lebih baik dibandingkan temperatur 45°C.

b. Pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*



Gambar 4.5 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang XY pada Konfigurasi *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Dari gambar 4.5 di atas diperoleh kontur fraksi massa H₂O bidang XY pada konfigurasi *perforated plate staggered* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Pada kontur tersebut terlihat memiliki perbedaan pada bagian *outlet*. Pada bagian sisi *outlet* temperatur 65°C memiliki warna yang cenderung lebih muda dibanding sisi *outlet* *drying chamber* temperatur 45°C. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan jumlah kandungan fraksi massa H₂O pada variasi temperatur tersebut. Dari ketiga kontur fraksi massa H₂O tersebut menunjukkan bahwa kandungan air pada sisi *outlet* lebih tinggi dibandingkan daerah sisi *inlet*. Ditunjukkan dengan adanya perubahan warna dari biru tua menjadi biru muda yang mengartikan terjadinya perubahan fraksi massa H₂O selama proses pengeringan di dalam *drying chamber*. Hal ini dikarenakan saat udara pengering masuk *drying chamber* dan melewati batubara, maka kandungan air di dalam batubara terbawa oleh udara pengering menuju ke *outlet* sehingga udara pengering mengalami peningkatan kandungan air atau jumlah fraksi massa H₂O.

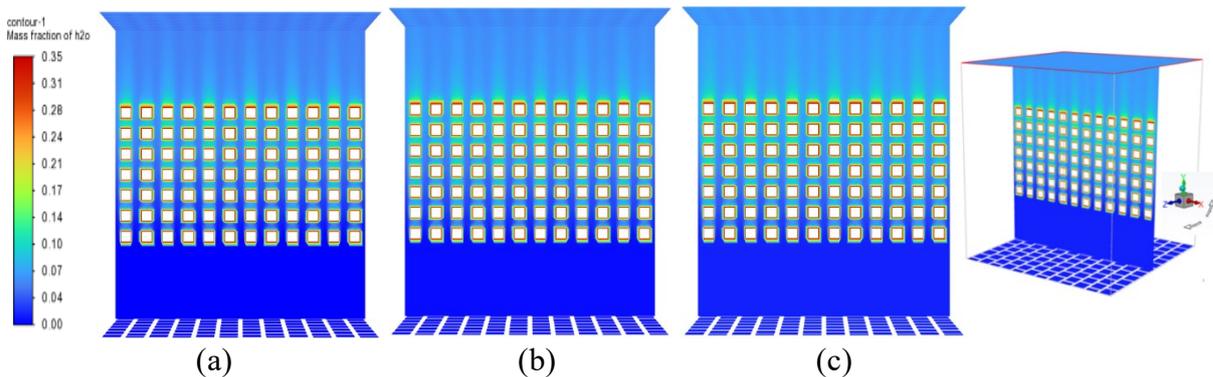
Secara teoritis terdapat hubungan antara temperatur udara pengering dengan laju perpindahan massa H₂O pada batubara yang diterangkan dalam persamaan perpindahan panas.

$$Q = h \times A \times (T_{udara} - T_{coal})$$

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

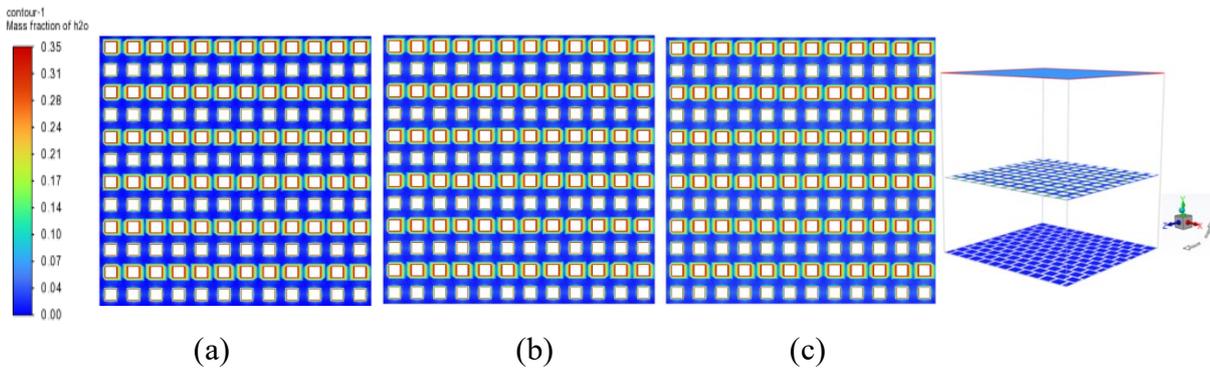
Dalam persamaan tersebut, didapatkan bahwa semakin tinggi nilai delta temperatur, maka akan diikuti dengan naiknya proses perpindahan panas. Apabila nilai perpindahan panas meningkat, maka mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas menjadi meningkat pula dikarenakan berbanding lurus. Semakin tinggi nilai koefisien perpindahan panas, maka mengakibatkan laju perpindahan massa air dari batubara menuju udara pengering semakin tinggi dikarenakan naiknya koefisien perpindahan massa.

Disamping itu, semakin tinggi temperatur udara pengering maka akan semakin menurunkan nilai *relative humidity* pada udara pengering dan kapasitas kandungan uap air dalam udara akan semakin besar. *Relative humidity* yang rendah akan menyebabkan *transfer* panas dan massa dari batubara ke udara semakin besar dan energi panas dalam udara pengering mampu menguapkan molekul-molekul air yang ada pada permukaan batubara. Oleh karena itu, pada temperatur 65°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O tertinggi dan temperatur 45°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O terendah, yang berarti temperatur 65°C memiliki kemampuan penguapan volume H₂O batubara yang lebih baik dibandingkan temperatur 45°C.



Gambar 4.6 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang YZ pada Konfigurasi *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

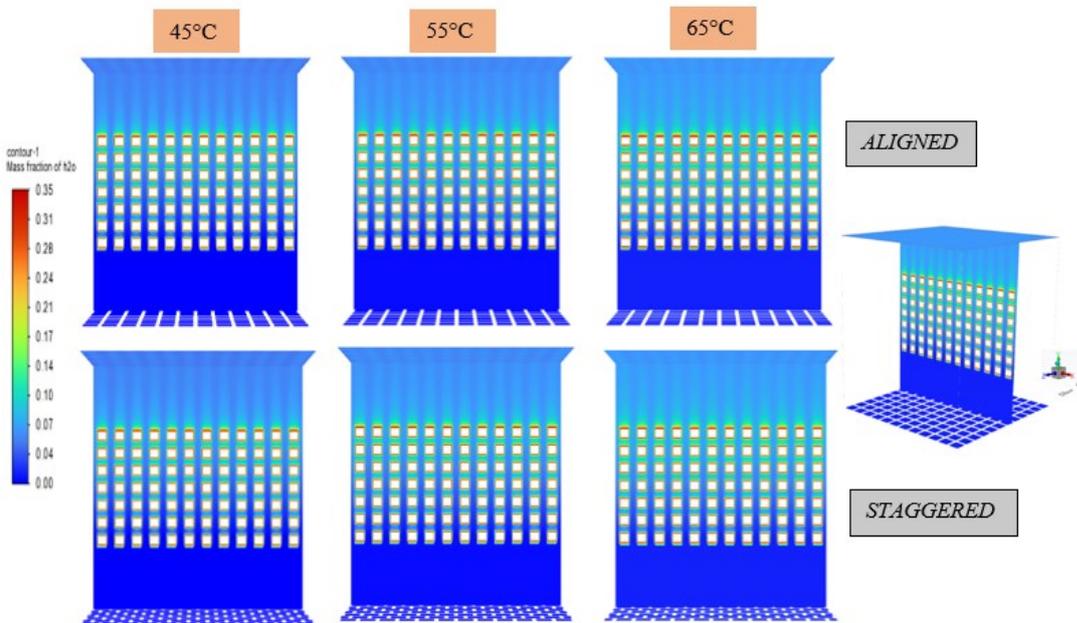
Pada gambar 4.6 diatas merupakan kontur fraksi massa H₂O bidang YZ pada konfigurasi *perforated plate staggered* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Pada kontur tersebut terlihat memiliki perbedaan yang cukup signifikan pada bagian *outlet* dan *inlet*. Saat udara memasuki *drying chamber* kontur berwarna biru tua yang menandakan bahwa kandungan air masih rendah sedangkan pada sisi *outlet drying chamber* kontur fraksi massa H₂O berwarna lebih muda dibandingkan warna sekitar *inlet*, yang mengartikan jumlah kandungan air atau fraksi massa H₂O udara pengering pada sisi *outlet* relatif lebih banyak dibandingkan fraksi massa H₂O udara pengering pada sisi *inlet*. Terjadinya peningkatan jumlah kandungan H₂O pada udara pengering merupakan fenomena proses pengeringan, pada proses pengeringan ini juga terjadi proses penurunan *moisture content* pada batubara.



Gambar 4.9 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang XZ pada Konfigurasi *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Kemudian pada gambar 4.7 diatas merupakan kontur fraksi massa H₂O bidang XZ pada konfigurasi *perforated plate staggered* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Pada ketiga kontur tersebut memiliki perbedaan yang tidak signifikan, dapat dilihat bahwa pada temperatur 65°C berwarna biru yang lebih muda dibanding temperatur 45°C, hal ini mengartikan temperatur 65°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O tertinggi dan temperatur 45°C memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H₂O terendah. Hal ini berarti temperatur 65°C memiliki kemampuan penguapan volume H₂O batubara yang lebih baik dibandingkan temperatur 45°C.

4.3.1.2 Analisa Kontur Fraksi Massa H₂O dengan Variasi Konfigurasi *Perforated Plate*



Gambar 4.10 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang XY pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered*

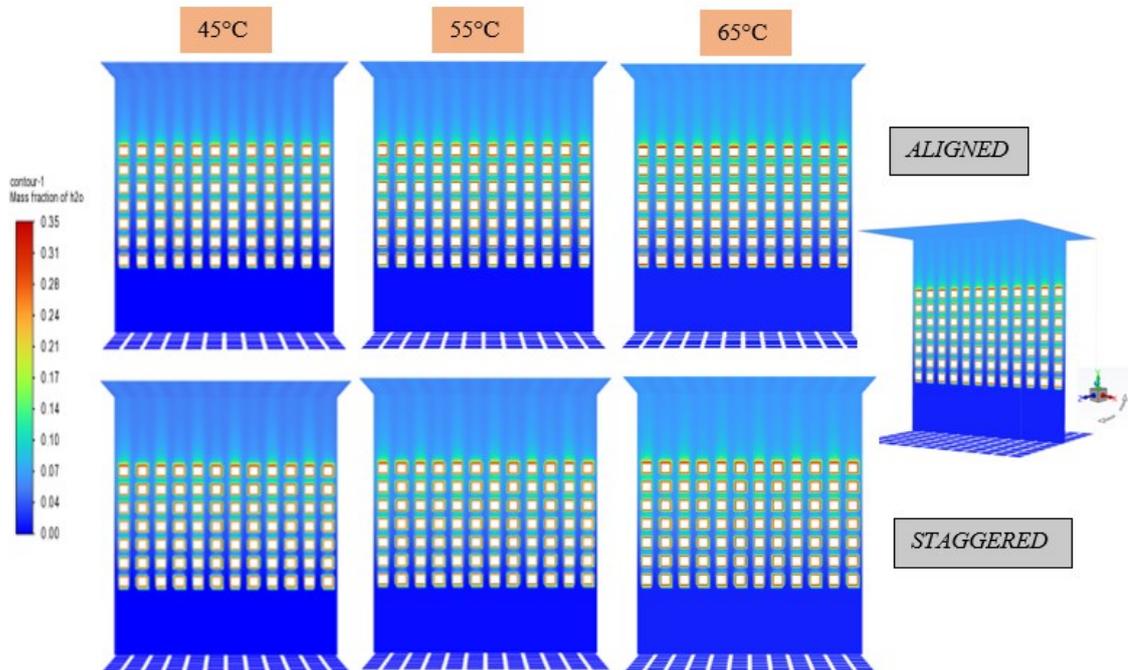
Pada gambar 4.8 diatas merupakan kontur fraksi massa H₂O bidang XY dengan temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Dapat dilihat bahwa kontur fraksi massa H₂O pada ketiga temperatur dengan variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Sehingga konfigurasi *perforated plate aligned* maupun *staggered* tidak memberikan pengaruh terhadap proses pengeringan batubara. Terdapat kesamaan dari kontur fraksi massa H₂O pada *perforated plate aligned* dan *staggered* di atas yaitu kandungan air pada sisi *outlet*

lebih tinggi dibandingkan daerah sisi *inlet*. Dapat dilihat adanya perubahan warna dari biru tua pada sisi *inlet* menjadi berwarna lebih muda pada bagian *outlet*. Hal ini disebabkan karena kandungan air di dalam batubara telah terbawa oleh udara pengering menuju ke sisi *outlet* sehingga semakin ke atas maka kandungan airnya akan semakin banyak. Sehingga pada proses pengeringan ini juga terjadi proses penurunan *moisture content* pada batubara.

Pada proses pengeringan, perpindahan massa dapat ditunjukkan dengan adanya peningkatan fraksi massa H₂O. Pada saat udara kering dengan temperatur 65°C memasuki *drying chamber* memiliki nilai fraksi massa H₂O sebesar 0,01614 kg H₂O/ kg air namun pada saat keluar *drying chamber* nilai fraksi massa H₂O-nya meningkat menjadi 0,020184 kg H₂O/ kg air. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya perpindahan massa dengan laju perpindahan massa uap air yang diterima oleh udara pengering pada sisi *outlet* dengan persamaan di bawah.

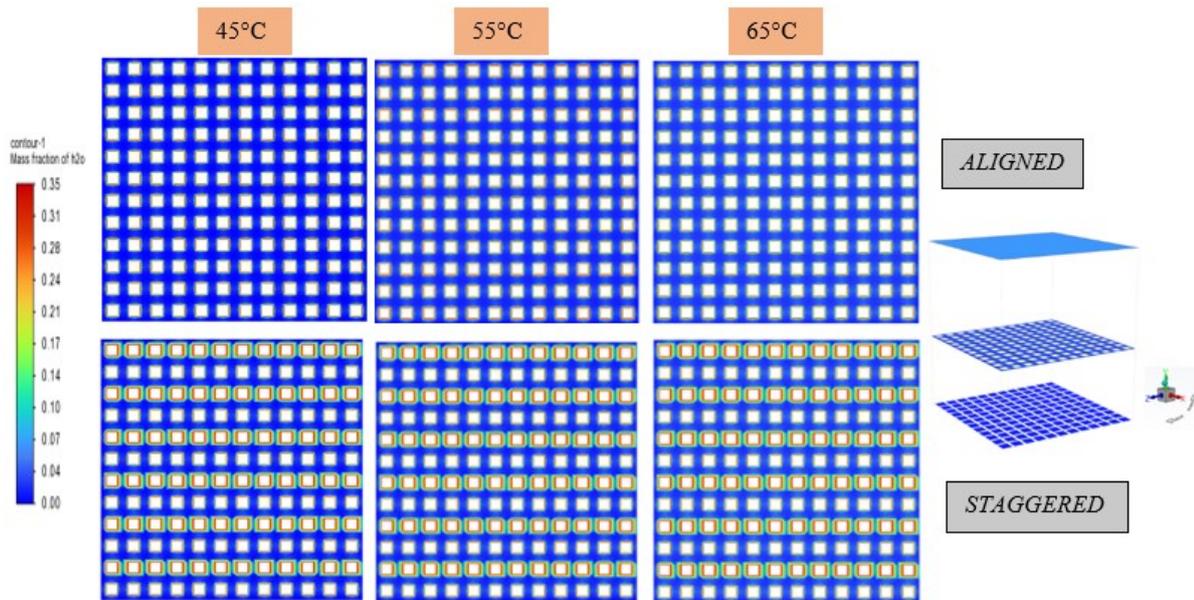
$$\dot{m}a'' = \dot{m} \cdot (\omega_{outlet} - \omega_{inlet})$$

Berdasarkan hasil kontur, kedua konfigurasi *perforated plate* sama-sama mengalami peningkatan jumlah fraksi massa H₂O atau *moisture content* pada udara pengering di sisi *outlet*, namun keduanya tidak memiliki perbedaan yang signifikan sehingga dapat disimpulkan bahwa baik konfigurasi *aligned perforated plate* maupun *staggered* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap proses pengeringan.



Gambar 4.11 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang YZ pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned dan Staggered*

Hal yang serupa terjadi pada kontur fraksi massa H₂O bidang YZ dengan temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* yang dapat dilihat pada gambar 4.9 diatas, bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada kontur fraksi massa H₂O bidang YZ pada konfigurasi *perforated plate* baik *aligned* maupun *staggered*. Keduanya sama-sama mengalami proses penambahan *moisture content* pada sisi *outlet*.



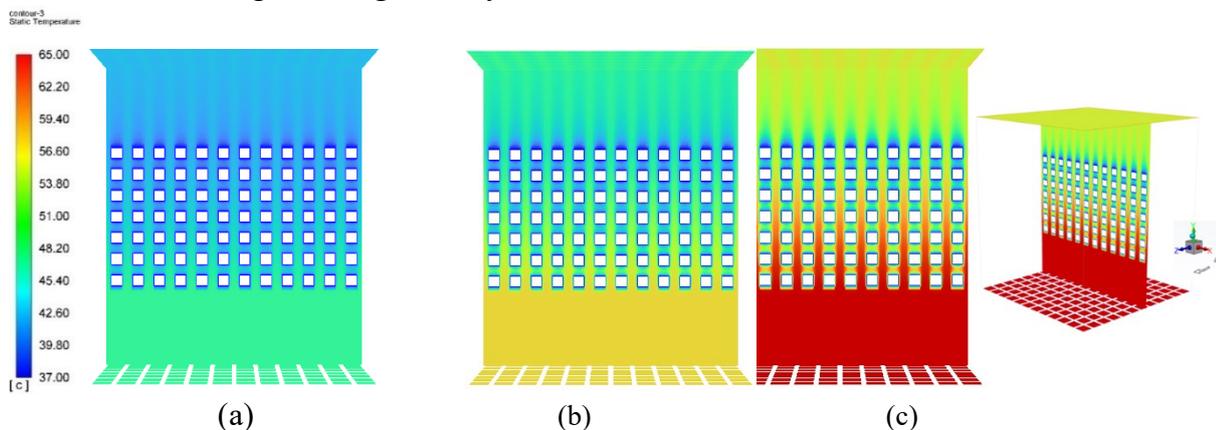
Gambar 4.12 Kontur Fraksi Massa H₂O Bidang XZ pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered*

Selanjutnya pada gambar 4.10 ialah kontur fraksi massa H₂O bidang XZ dengan temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Dapat dilihat pada konfigurasi *perforated plate staggered* di daerah sekitar batubara didominasi oleh warna hijau, sedangkan pada konfigurasi *perforated plate aligned* daerah sekitar batubara cenderung berwarna biru muda. Warna yang lebih hijau menandakan bahwa batubara mengandung massa H₂O lebih banyak. Sehingga pada temperatur baik 45°C, 55°C, dan 65°C dengan konfigurasi *perforated plate aligned* sedikit lebih kering dibandingkan pada konfigurasi *perforated plate staggered*.

4.3.2 Analisa Kontur Temperatur

4.3.2.1 Analisa Kontur Temperatur dengan Variasi Temperatur

a. Pada Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*



Gambar 4.13 Kontur Temperatur Bidang XY pada Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Berdasarkan kontur temperatur bidang XY pada konfigurasi *perforated plate aligned* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C memiliki temperatur pada sisi *outlet* yang lebih rendah daripada daerah sisi *inlet* dan sisi tengah ruang pengering. Hal ini dikarenakan ketika udara pengering masuk *drying chamber* pada sisi *inlet* dan melewati susunan batubara

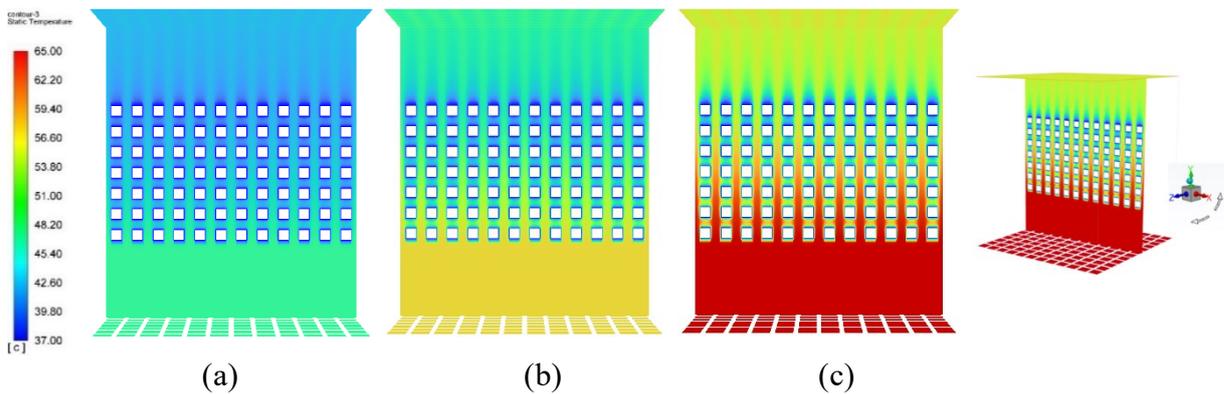
yang memiliki temperatur lebih rendah maka udara pengering mengalami penurunan temperatur karena proses perpindahan panas.

Secara teoritis fenomena turunnya temperatur *drying chamber* dapat dikaitkan dengan terjadinya penurunan laju pengeringan batubara di dalam *fluidized bed coal dryer*. Akibat terjadinya proses perpindahan panas dari udara pengering menuju batubara, maka menyebabkan turunnya temperatur udara pengering, yang mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas turut menurun. Dimana nilai koefisien perpindahan panas akan menentukan nilai koefisien perpindahan massa sesuai dengan persamaan berikut.

$$Q = h \times A \times (T_{udara} - T_{coal})$$

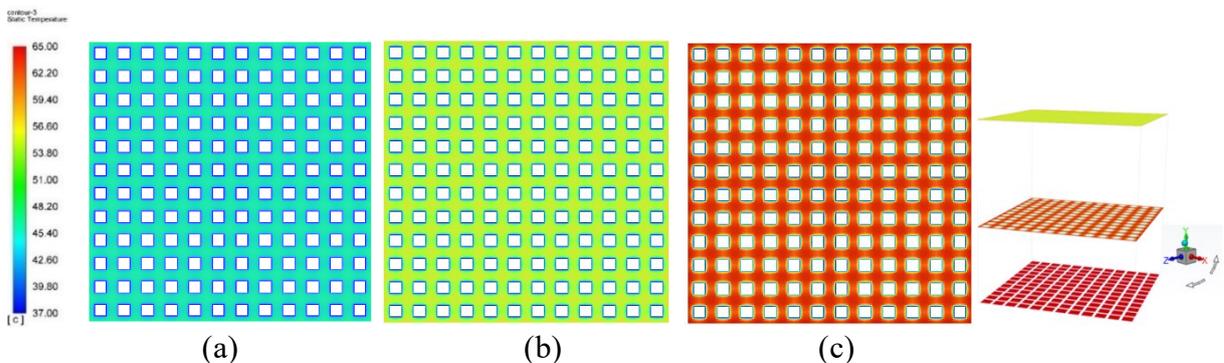
$$h_m = \frac{h \times D_{AB} \times Le^n}{k}$$

Turunnya nilai koefisien perpindahan panas akan mengakibatkan turunnya nilai koefisien perpindahan massa. Oleh karena itu fenomena turunnya laju pengeringan akan diikuti dengan turunnya perbedaan suhu antara temperatur udara pengering dengan temperatur batubara.



Gambar 4.16 Kontur Temperatur Bidang YZ pada Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Dari gambar 4.12 di atas diperoleh kontur temperatur bidang YZ pada konfigurasi *perforated plate aligned* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C memiliki temperatur pada sisi *outlet* yang lebih rendah dibandingkan daerah sisi *inlet* dan sisi tengah *chamber* pengering. Hal ini disebabkan oleh udara pengering yang masuk pada sisi *inlet* mengalami penurunan temperatur setelah melewati susunan batubara yang tersusun sama juga memiliki temperatur yang lebih rendah. Untuk bentuk dari kontur bidang YZ ini kurang lebih sama dengan bidang XY.

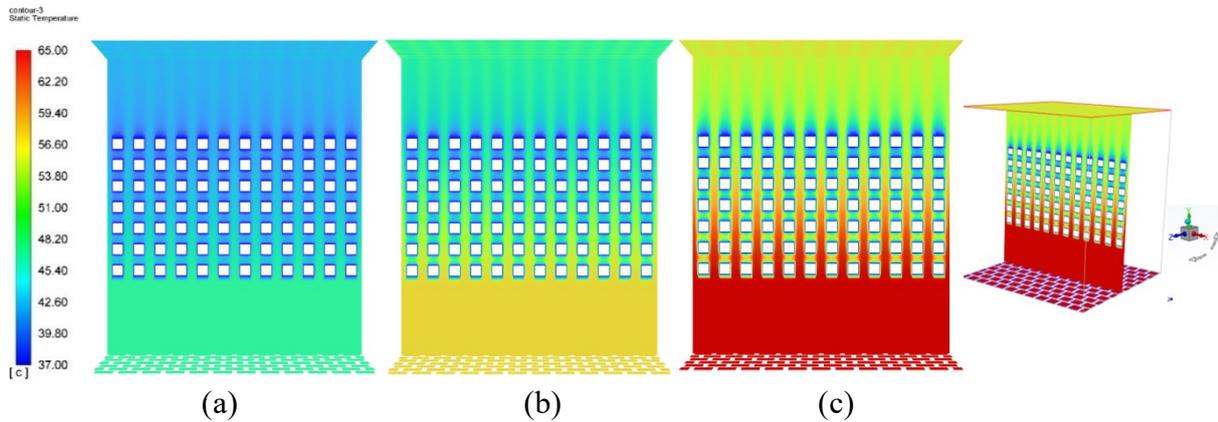


Gambar 4.17 Kontur Temperatur Bidang XZ pada Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Dari gambar 4.13 di atas diperoleh kontur temperatur bidang XZ pada konfigurasi *perforated plate aligned* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Dimana terlihat

bahwa pada kontur temperatur bidang XZ pada temperatur 45°C memiliki warna kontur biru muda yang tersebar merata, begitu juga pada temperatur 55°C dan 65°C. Hal ini mengartikan bahwa persebaran temperatur udara pengering pada *plane XZ* dalam *drying chamber* memiliki persebaran yang merata.

b. Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*



Gambar 4.18 Kontur Temperatur Bidang XY pada Konfigurasi *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

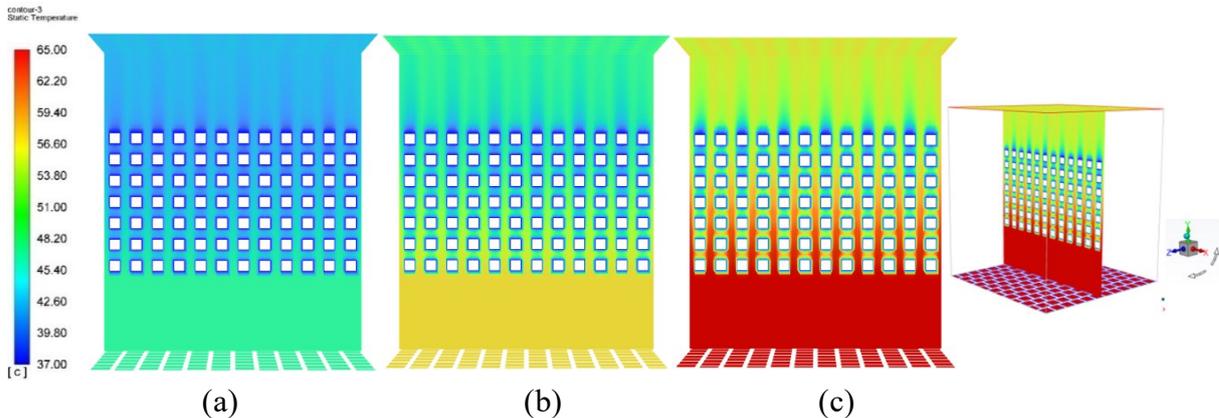
Berdasarkan kontur temperatur bidang XY pada konfigurasi *perforated plate staggered* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C memiliki temperatur pada sisi *outlet* yang lebih rendah daripada daerah sisi *inlet* dan sisi tengah ruang pengering. Hal ini dikarenakan ketika udara pengering masuk *drying chamber* pada sisi *inlet* dan melewati susunan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah maka udara pengering mengalami penurunan temperatur karena proses perpindahan panas.

Secara teoritis fenomena turunnya temperatur *drying chamber* dapat dikaitkan dengan terjadinya penurunan laju pengeringan batubara di dalam *fluidized bed coal dryer*. Akibat terjadinya proses perpindahan panas dari udara pengering menuju batubara, maka menyebabkan turunnya temperatur udara pengering, yang mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas turut menurun. Dimana nilai koefisien perpindahan panas akan menentukan nilai koefisien perpindahan massa sesuai dengan persamaan berikut.

$$Q = h \times A \times (T_{udara} - T_{coal})$$

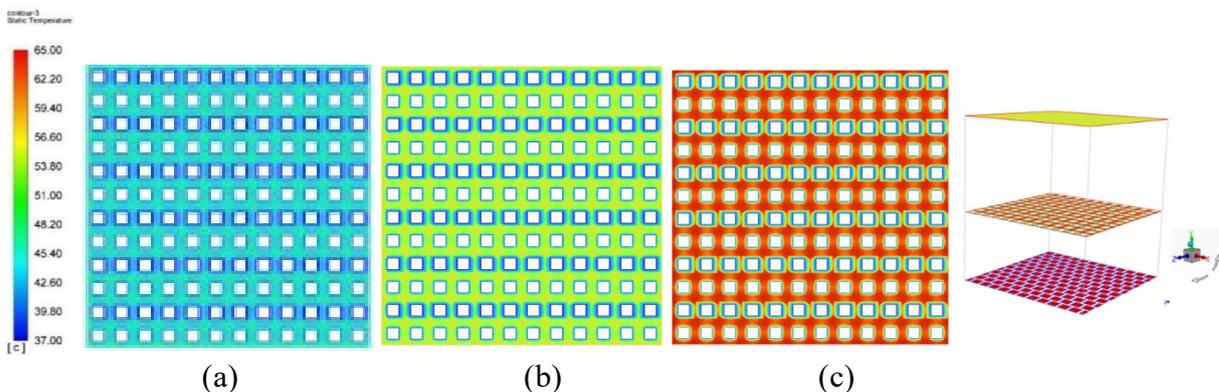
$$h_m = \frac{h \times D_{AB} \times Le^n}{k}$$

Turunnya nilai koefisien perpindahan panas akan mengakibatkan turunnya nilai koefisien perpindahan massa. Oleh karena itu fenomena turunnya laju pengeringan akan diikuti dengan turunnya perbedaan suhu antara temperatur udara pengering dengan temperatur batubara.



Gambar 4.19 Kontur Temperatur Bidang YZ pada Konfigurasi *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

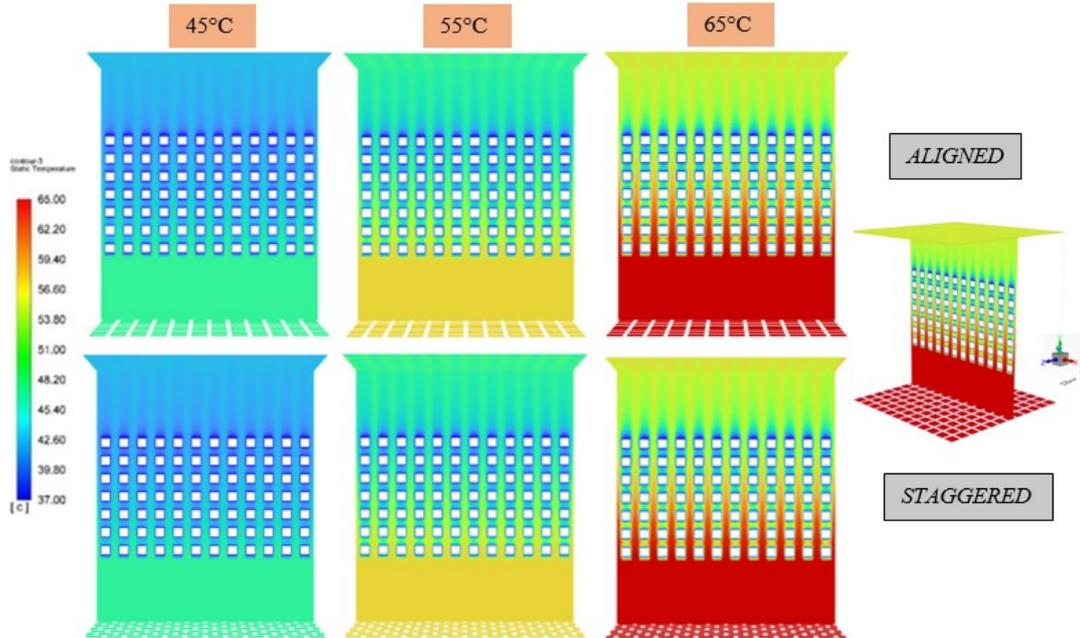
Dari gambar 4.15 di atas diperoleh kontur temperatur bidang YZ pada konfigurasi *perforated plate staggered* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C memiliki temperatur pada sisi *outlet* yang lebih rendah dibandingkan daerah sisi *inlet* dan sisi tengah *chamber* pengering. Hal ini disebabkan oleh udara pengering yang masuk pada sisi *inlet* mengalami penurunan temperatur setelah melewati susunan batubara yang tersusun sama juga memiliki temperatur yang lebih rendah. Untuk bentuk dari kontur bidang YZ ini kurang lebih sama dengan bidang XY.



Gambar 4.20 Kontur Temperatur Bidang XZ pada Konfigurasi *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

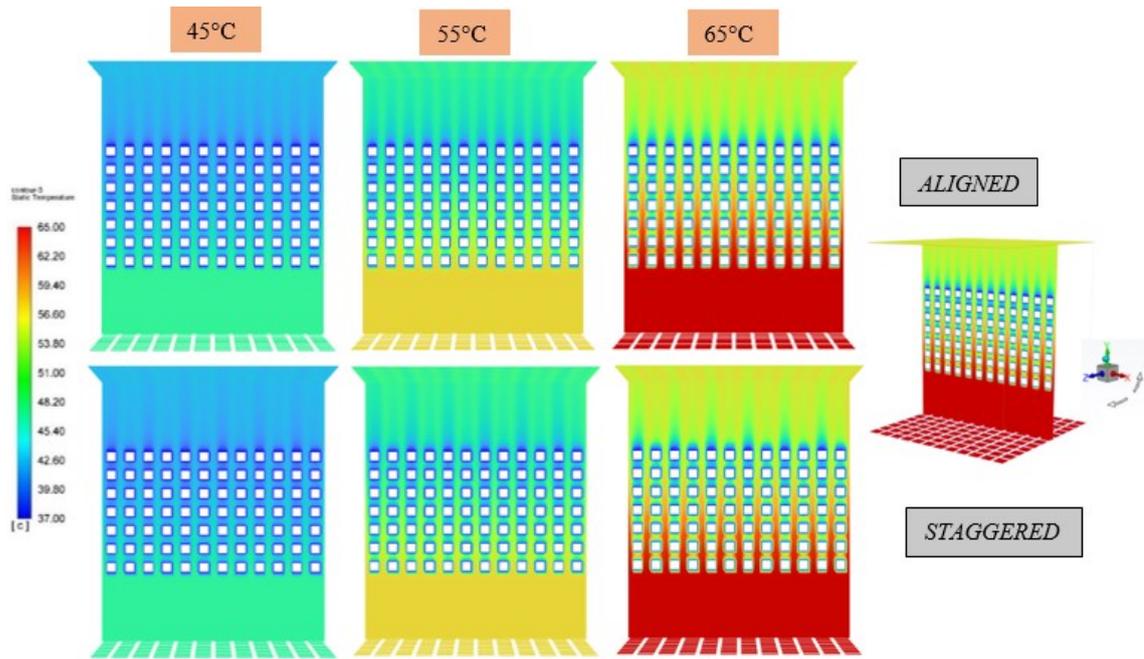
Dari gambar 4.16 di atas diperoleh kontur temperatur bidang XZ pada konfigurasi *perforated plate staggered* dengan variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Dimana terlihat bahwa pada kontur temperatur bidang XZ pada temperatur 45°C memiliki warna kontur biru muda yang tersebar merata, namun pada beberapa baris daerah di sekitar batubara terlihat warna kontur biru tua yang menandakan batubara masih mengandung H₂O yang banyak, hal ini juga terjadi pada plane XZ temperatur 55°C dan 65°C. Hal ini mengartikan bahwa persebaran temperatur udara pengering pada *plane XZ* dalam *drying chamber* memiliki persebaran yang kurang merata.

4.3.2.2 Analisa Kontur Temperatur dengan Variasi Konfigurasi *Perforated Plate*



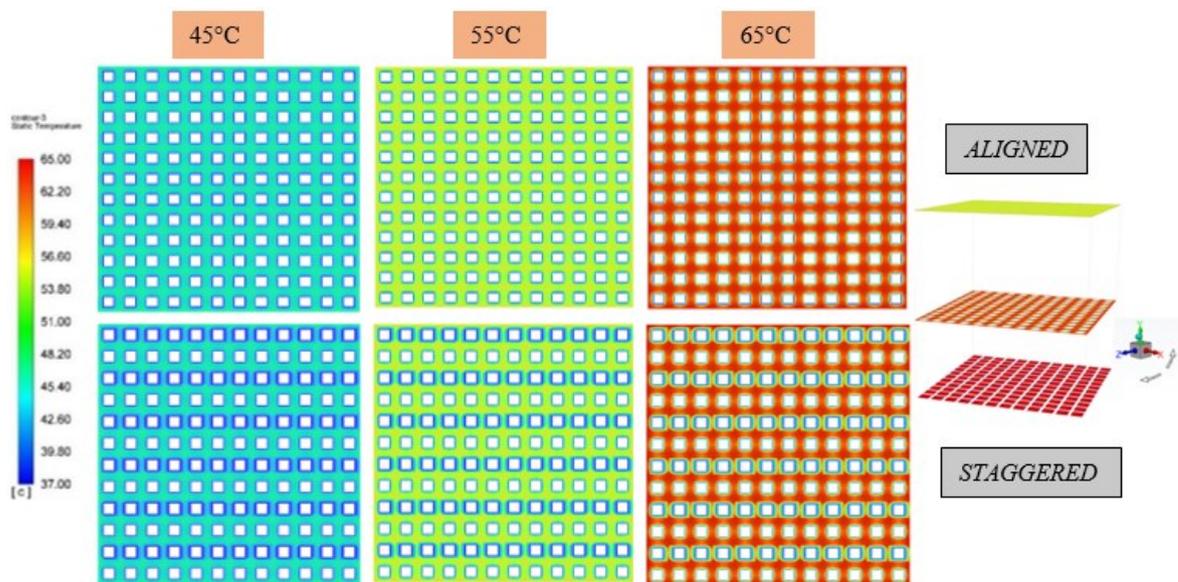
Gambar 4.21 Kontur Temperatur Bidang XY pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered*

Pada gambar 4.17 di atas merupakan kontur temperatur bidang XY dengan temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan kontur temperatur mengalami penurunan temperatur di dalam *drying chamber* saat melewati batubara. Seperti pada temperatur 65°C, penurunan ini ditandai dengan perubahan warna dari merah pada sisi *inlet* menjadi warna kuning pada sisi *outlet*. Dimana warna merah menandakan temperatur yang lebih tinggi dibanding warna kuning. Perubahan temperatur antara udara masuk dengan udara keluar di dalam *drying chamber* terlihat cukup signifikan. Penurunan temperatur ini dikarenakan adanya perpindahan panas antara udara pengering dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah. Dapat dilihat pula bahwa kontur temperatur pada temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C baik konfigurasi *aligned* maupun *staggered perforated plate* tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Sehingga didapatkan bahwa baik konfigurasi *perforated plate aligned* maupun *staggered* tidak memberikan pengaruh terhadap proses pengeringan batubara. Hal ini dikarenakan luasan dari *flow open area* dari kedua *perforated* tersebut bernilai sama.



Gambar 4.23 Kontur Temperatur Bidang YZ pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered*

Hal yang serupa terjadi pada kontur temperatur bidang YZ dengan temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* yang dapat dilihat pada gambar 4.18 diatas, bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada kontur temperatur bidang YZ pada konfigurasi *perforated plate* baik *aligned* maupun *staggered*. Keduanya sama-sama mengalami proses penurunan temperatur udara pengering pada sisi *inlet*.



Gambar 4.22 Kontur Temperatur Bidang XZ pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered*

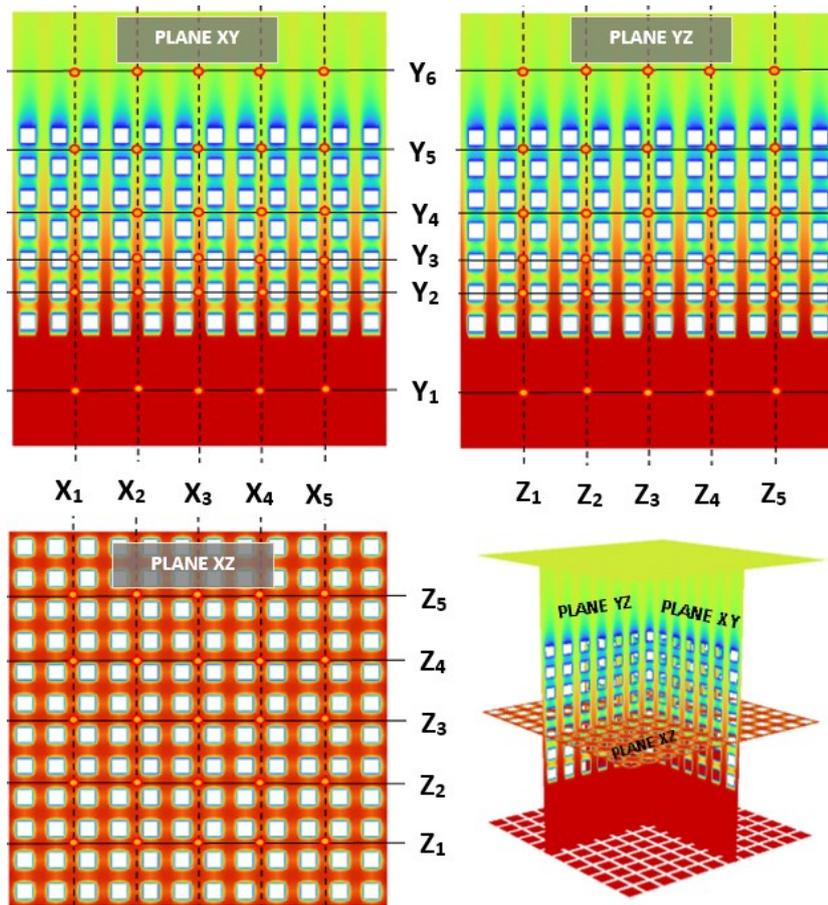
Selanjutnya pada gambar 4.19 ialah kontur temperatur bidang XZ dengan temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Dapat dilihat pada temperatur 45°C pada konfigurasi *perforated plate staggered* memiliki warna kontur biru muda yang tersebar merata, namun pada beberapa baris daerah di sekitar batubara terlihat warna

kontur biru tua yang menandakan batubara masih mengandung H_2O yang banyak, hal ini juga terjadi pada plane XZ temperatur $55^\circ C$ dan $65^\circ C$. Sedangkan pada konfigurasi *aligned perforated plate* baik temperatur $45^\circ C$, $55^\circ C$, dan $65^\circ C$ memiliki persebaran temperatur yang merata. Sehingga pada temperatur $45^\circ C$, $55^\circ C$, dan $65^\circ C$ dengan konfigurasi *perforated plate aligned* sedikit lebih kering dibandingkan pada konfigurasi *perforated plate staggered*. Namun perbedaan antara konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan luasan dari *flow open area* dari kedua *perforated* tersebut bernilai sama.

4.4 Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H_2O

4.4.1 Distribusi Temperatur

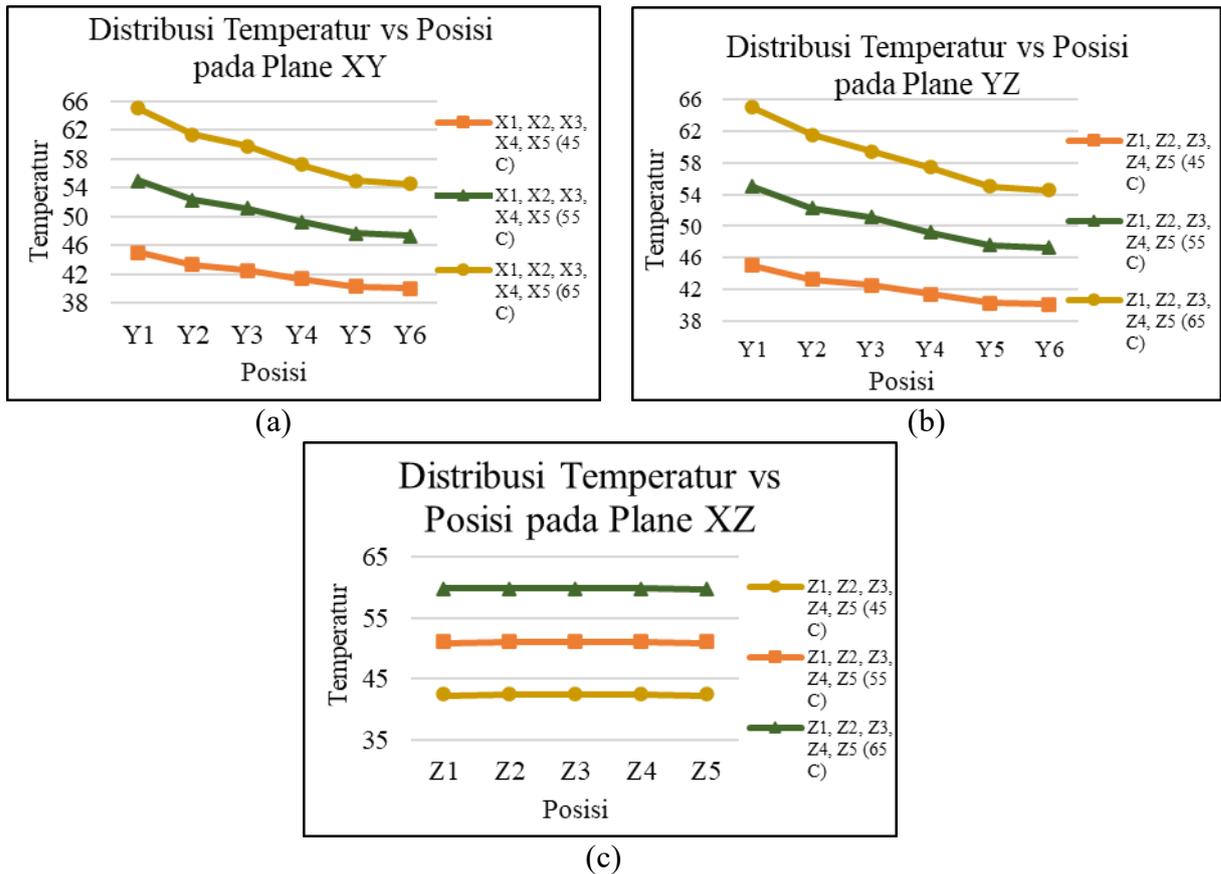
Gambar di bawah adalah posisi titik pengambilan data sampel yang digunakan untuk menggambarkan distribusi temperatur pada ruang pengering batubara.



Gambar 4.26 Posisi Pengambilan Titik Distribusi Temperatur Pada Plane XY, YZ, dan XZ

4.4.1.1 Distribusi Fraksi Massa H₂O dengan Variasi Temperatur

- Grafik Distribusi Temperatur pada Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*

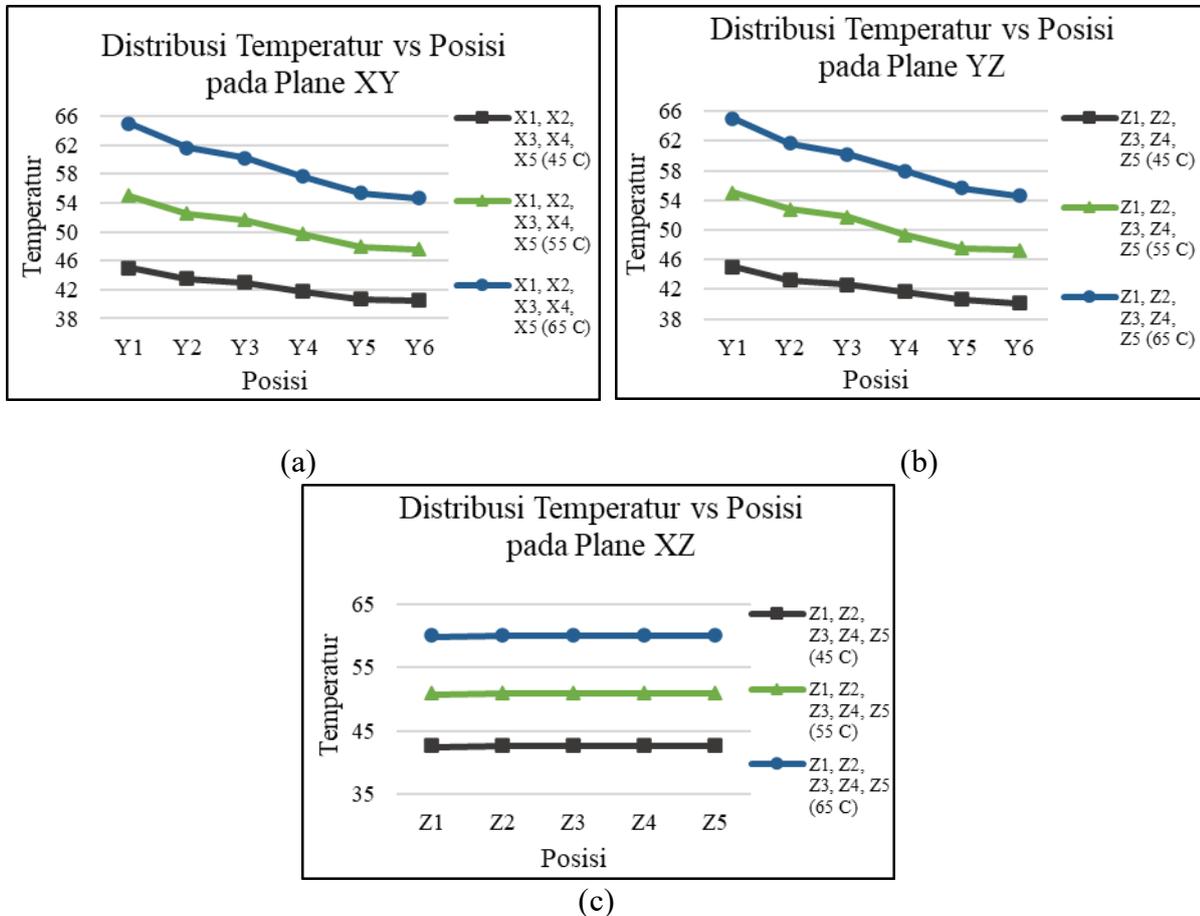


Gambar 4.27 Grafik Distribusi Temperatur pada Konfigurasi *Aligned Perforated Plate* (a) *Plane XY*, (b) *Plane YZ*, (c) *Plane XZ*

Gambar 4.21 di atas menunjukkan data kuantitatif dari gambaran kontur temperatur pada kecepatan *inlet* yang sama yaitu 2,4 m/s dari ketiga variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada konfigurasi *perforated plate aligned*. Dapat terlihat bahwa pada *plane XY* dan *XZ* untuk garis X1, X2, X3, X4, dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama. Hal ini terjadi juga pada *plane YZ* pada garis Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama pula. Kemudian terdapat kesamaan juga untuk *trendline* pada *plane XY* dan *YZ* yaitu mengalami penurunan temperatur udara pengering dari posisi 1-6. Hal ini dikarenakan terjadinya proses perpindahan panas ketika udara pengering melewati susunan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah, sehingga semakin ke atas temperatur udara pengering akan terus berkurang. Pada *plane XY* dan *YZ* untuk posisi 2-3 penurunan temperatur udara pengering tidak sebanyak pada posisi 3-4 dan 4-5 hal ini dikarenakan jarak pengambilan letak posisi untuk 2-3 terlalu berdekatan, hanya pada batubara tingkatan ke 2 dan 3, sedangkan pada posisi 4-5 jarak pengambilan letak distribusi sedikit jauh yaitu pada tingkatan batubara ke 4 dan 6, sehingga jumlah penurunan temperatur banyak. Kemudian pada posisi 5-6 terlihat bahwa jumlah penambahan temperatur sedikit, hal ini dikarenakan temperatur udara pengering pada sisi *outlet* telah mendekati temperatur batubara sehingga proses penipindahan panasnya sangat kecil. Kemudian pada *plane XZ* terlihat bahwa temperatur udara pengering terdistribusi secara merata pada tiap posisinya. Didapatkan juga pada *plane XY* dan *YZ* bahwa pada temperatur 65°C mengalami kenaikan penurunan

temperatur yang lebih besar dibandingkan temperatur 45°C. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur maka akan semakin turun nilai *relative humidity* pada udara pengering. *Relative humidity* yang rendah akan menyebabkan transfer panas dan massa dari batubara ke udara semakin besar dan energi panas dalam udara pengering mampu menguapkan molekul-molekul air yang ada pada permukaan batubara. Sehingga temperatur udara pengering pada posisi 6 atau outlet semakin rendah.

- Grafik Distribusi Temperatur pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*



Gambar 4.28 Grafik Distribusi Temperatur pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate* (a) *Plane XY*, (b) *Plane YZ*, (c) *Plane XZ*

Gambar 4.22 di atas menunjukkan data kuantitatif dari gambaran kontur temperatur pada kecepatan *inlet* yang sama yaitu 2,4 m/s dari ketiga variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada konfigurasi *perforated plate staggered*. Dapat terlihat bahwa pada *plane XY* dan *XZ* untuk garis X1, X2, X3, X4, dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama. Hal ini terjadi juga pada *plane YZ* pada garis Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama pula. Kemudian terdapat kesamaan juga untuk *trendline* pada *plane XY* dan *YZ* yaitu mengalami penurunan temperatur udara pengering dari posisi 1-6. Hal ini dikarenakan terjadinya proses perpindahan panas ketika udara pengering melewati susunan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah, sehingga semakin ke atas temperatur udara pengering akan terus berkurang. Pada *plane XY* dan *YZ* untuk posisi 2-3 penurunan temperatur udara pengering tidak sebanyak pada posisi 3-4 dan 4-5 hal ini dikarenakan jarak pengambilan letak posisi untuk 2-3 terlalu berdekatan, hanya pada batubara

tingkatan ke 2 dan 3, sedangkan pada posisi 4-5 jarak pengambilan letak distribusi sedikit jauh yaitu pada tingkatan batubara ke 4 dan 6, sehingga jumlah penurunan temperatur banyak. Kemudian pada posisi 5-6 terlihat bahwa jumlah penambahan temperatur sedikit, hal ini dikarenakan temperatur udara pengering pada sisi *outlet* telah mendekati temperatur batubara sehingga proses perpindahan panasnya sangat kecil. Kemudian pada *plane XZ* terlihat bahwa temperatur udara pengering terdistribusi secara merata pada tiap posisinya. Didapatkan juga pada *plane XY* dan *YZ* bahwa pada temperatur 65°C mengalami kenaikan penurunan temperatur yang lebih besar dibandingkan temperatur 45°C. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur maka akan semakin turun nilai *relative humidity* pada udara pengering. *Relative humidity* yang rendah akan menyebabkan transfer panas dan massa dari batubara ke udara semakin besar dan energi panas dalam udara pengering mampu menguapkan molekul-molekul air yang ada pada permukaan batubara. Sehingga temperatur udara pengering pada posisi 6 atau outlet semakin rendah.

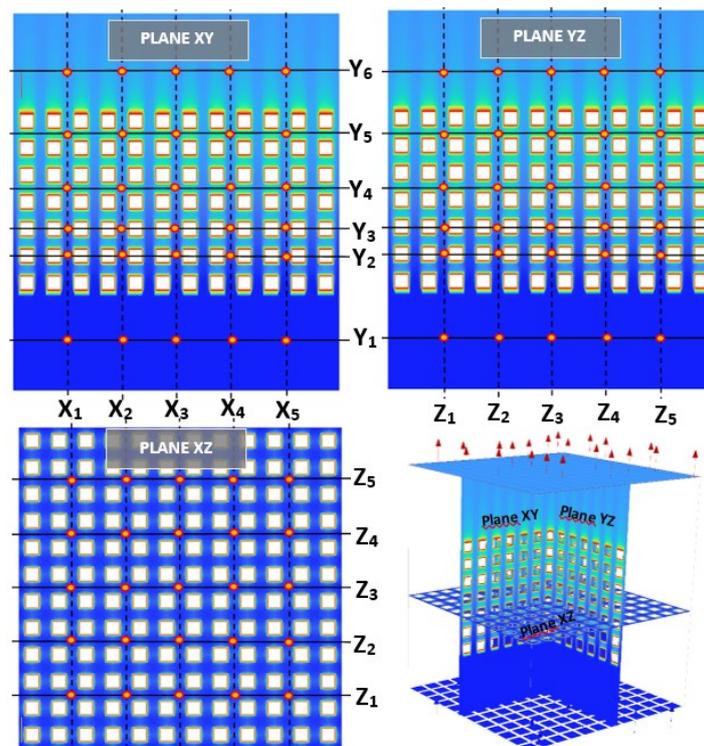
Proses Perpindahan panas terjadi antara batubara dengan udara pengering sesuai berdasarkan rumus berikut

$$q = h.A. (T_{inlet} - T_{coal})$$

tentunya nilai q bertambah besar karena nilai T_{inlet} semakin besar yang mengakibatkan nilai ΔT juga semakin besar. Sehingga dari ketiga variasi temperatur nilai q terbesar pada 65°C dan yang terkecil pada variasi 45°C. Pada proses iterasi terakhir memiliki nilai ΔT yang paling rendah, sehingga terjadi perpindahan panas yang kecil. Maka nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi (h), semakin besar.

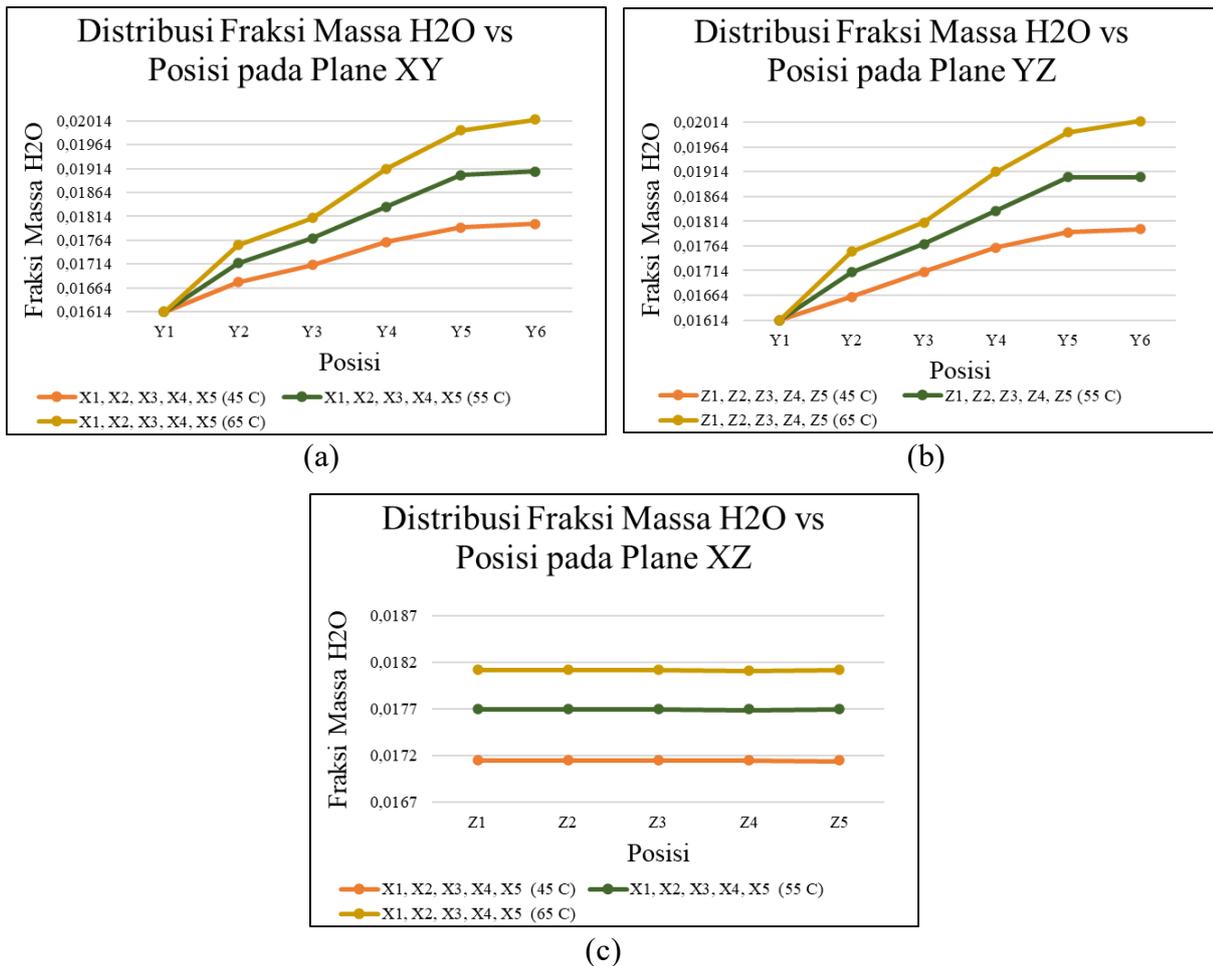
4.4.2 Distribusi Fraksi Massa H₂O

Gambar di bawah adalah posisi titik pengambilan data sampel yang digunakan untuk menggambarkan distribusi fraksi massa H₂O pada ruang pengering batubara.



Gambar 4.31 Posisi Pengambilan Titik Distribusi Fraksi Massa H₂O Pada *Plane XY*, *YZ*, dan *XZ*

- Grafik Distribusi Fraksi Massa H₂O pada Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*

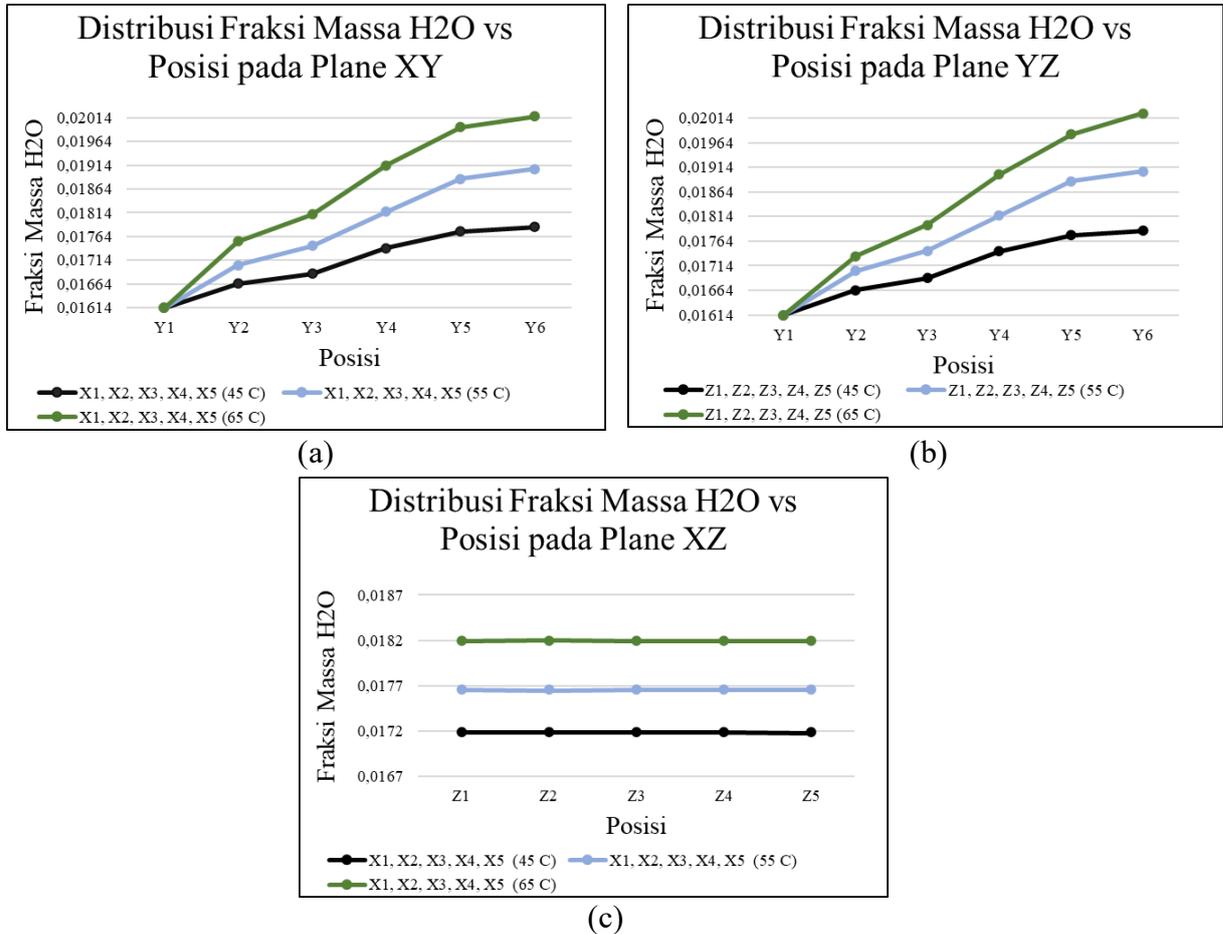


Gambar 4.32 Grafik Distribusi Fraksi Massa H₂O pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate* (a) *Plane XY*, (b) *Plane YZ*, (c) *Plane XZ*

Berdasarkan gambar 4.24 menunjukkan data kuantitatif dari gambaran kontur fraksi massa H₂O pada kecepatan *inlet* yang sama yaitu 2,4 m/s dari ketiga variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Dapat terlihat bahwa pada *plane XY* dan *XZ* untuk garis X1, X2, X3, X4, dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama. Hal ini terjadi juga pada *plane YZ* pada garis Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama pula. Kemudian terdapat kesamaan juga untuk *trendline* pada *plane XY* dan *YZ* yaitu mengalami kenaikan jumlah kandungan fraksi massa H₂O dari posisi 1-6. Hal ini dikarenakan udara pengering membawa kandungan H₂O dari batubara menuju ke sisi *outlet*, sehingga semakin ke atas kandungan fraksi massa H₂O udara pengering bertambah semakin banyak. Pada *plane XY* dan *YZ* untuk posisi 2-3 penambahan fraksi massa H₂O udara pengering tidak sebanyak pada posisi 3-4 dan 4-5 hal ini dikarenakan jarak pengambilan letak posisi untuk 2-3 terlalu berdekatan, hanya pada batubara tingkatan ke 2 dan 3, sedangkan pada posisi 4-5 jarak pengambilan letak distribusi sedikit jauh yaitu pada tingkatan batubara ke 4 dan 6, sehingga jumlah kandungan fraksi massa H₂O yang terbawa banyak. Kemudian pada posisi 5-6 terlihat bahwa jumlah penambahan fraksi massa H₂O sedikit, hal ini dikarenakan kapasitas kandungan H₂O pada udara pengering semakin besar sehingga kemampuan untuk menyerap *moisture content* batubara menjadi berkurang. Kemudian pada *plane XZ* terlihat bahwa kandungan fraksi massa H₂O terdistribusi secara merata pada tiap posisinya. Didapatkan juga

pada *plane* XY dan YZ bahwa pada temperatur 65°C mengalami kenaikan jumlah fraksi massa H₂O yang lebih besar dibandingkan temperatur 45°C. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur maka akan semakin turun nilai *relative humidity* pada udara pengering. *Relative humidity* yang rendah akan menyebabkan transfer panas dan massa dari batubara ke udara semakin besar dan energi panas dalam udara pengering mampu menguapkan molekul-molekul air yang ada pada permukaan batubara. Sehingga kandungan *moisture content* udara pengering pada posisi 6 atau outlet semakin tinggi. kesimpulan bahwa pada setiap kenaikan temperatur memiliki *trendline* yang sama.

- Grafik Distribusi Fraksi Massa H₂O pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*



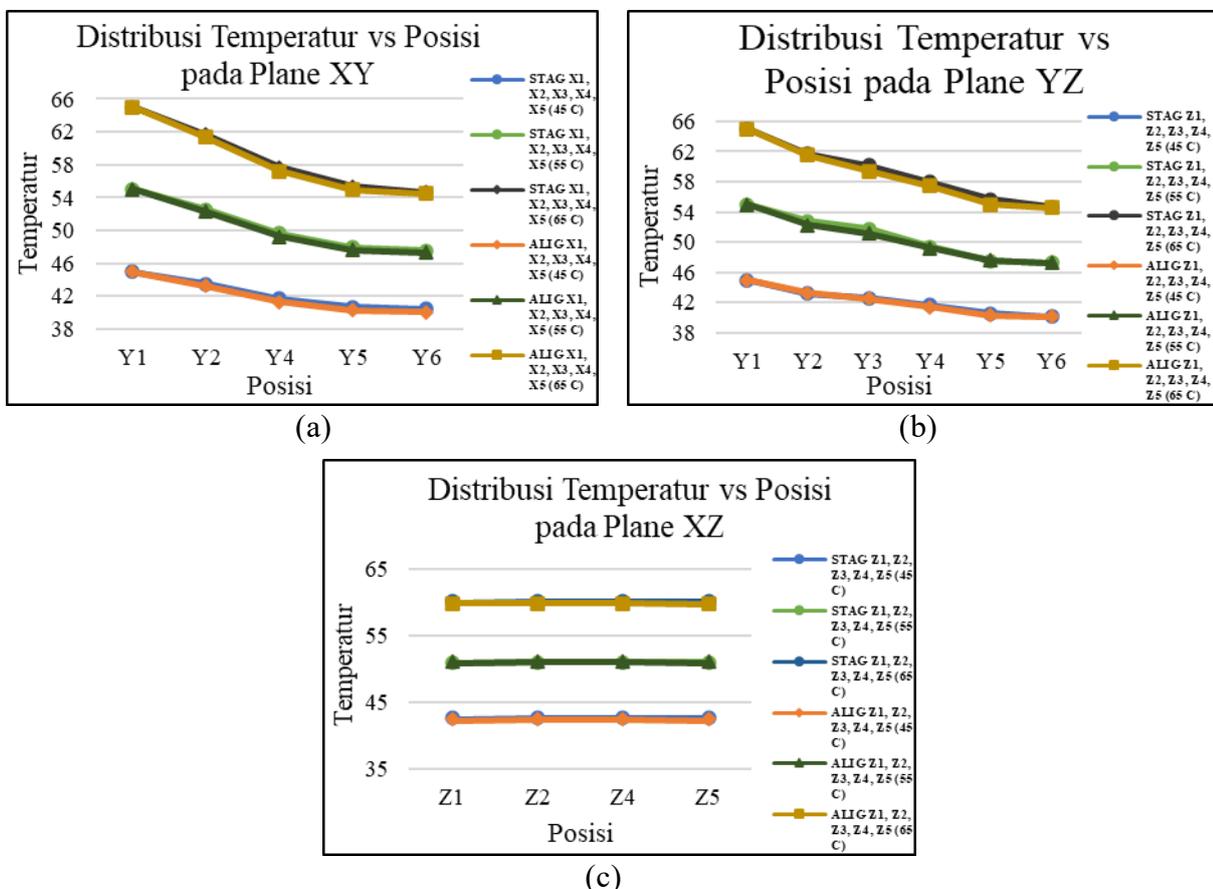
Gambar 4.33 Grafik Distribusi Fraksi Massa H₂O pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate* (a) *Plane* XY, (b) *Plane* YZ, (c) *Plane* XZ

Berdasarkan gambar 4.25 menunjukkan data kuantitatif dari gambaran kontur fraksi massa H₂O pada kecepatan *inlet* yang sama yaitu 2,4 m/s dari ketiga variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C pada konfigurasi *perforated plate staggered*. Dapat terlihat bahwa pada *plane* XY dan XZ untuk garis X1, X2, X3, X4, dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama. Hal ini terjadi juga pada *plane* YZ pada garis Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama pula. Kemudian terdapat kesamaan juga untuk *trendline* pada *plane* XY dan YZ yaitu mengalami kenaikan jumlah kandungan fraksi massa H₂O dari posisi 1-6. Hal ini dikarenakan udara pengering membawa kandungan H₂O dari batubara menuju ke sisi *outlet*, sehingga semakin ke atas kandungan fraksi massa H₂O udara pengering bertambah semakin banyak. Pada *plane* XY dan YZ untuk posisi

2-3 penambahan fraksi massa H₂O udara pengering tidak sebanyak pada posisi 3-4 dan 4-5 hal ini dikarenakan jarak pengambilan letak posisi untuk 2-3 terlalu berdekatan, hanya pada batubara tingkatan ke 2 dan 3, sedangkan pada posisi 4-5 jarak pengambilan letak distribusi sedikit jauh yaitu pada tingkatan batubara ke 4 dan 6, sehingga jumlah kandungan fraksi massa H₂O yang terbawa banyak. Kemudian pada posisi 5-6 terlihat bahwa jumlah penambahan fraksi massa H₂O sedikit, hal ini dikarenakan kapasitas kandungan H₂O pada udara pengering semakin besar sehingga kemampuan untuk menyerap *moisture content* batubara menjadi berkurang. Kemudian pada *plane XZ* terlihat bahwa kandungan fraksi massa H₂O terdistribusi secara merata pada tiap posisinya. Didapatkan juga pada *plane XY* dan *YZ* bahwa pada temperatur 65°C mengalami kenaikan jumlah fraksi massa H₂O yang lebih besar dibandingkan temperatur 45°C. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur maka akan semakin turun nilai *relative humidity* pada udara pengering. *Relative humidity* yang rendah akan menyebabkan transfer panas dan massa dari batubara ke udara semakin besar dan energi panas dalam udara pengering mampu menguapkan molekul-molekul air yang ada pada permukaan batubara. Sehingga kandungan *moisture content* udara pengering pada posisi 6 atau outlet semakin tinggi. kesimpulan bahwa pada setiap kenaikan temperatur memiliki *trendline* yang sama.

4.4.3 Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H₂O dengan Variasi Konfigurasi *Perforated Plate*

- Distribusi Temperatur dengan Variasi Konfigurasi *Perforated Plate*

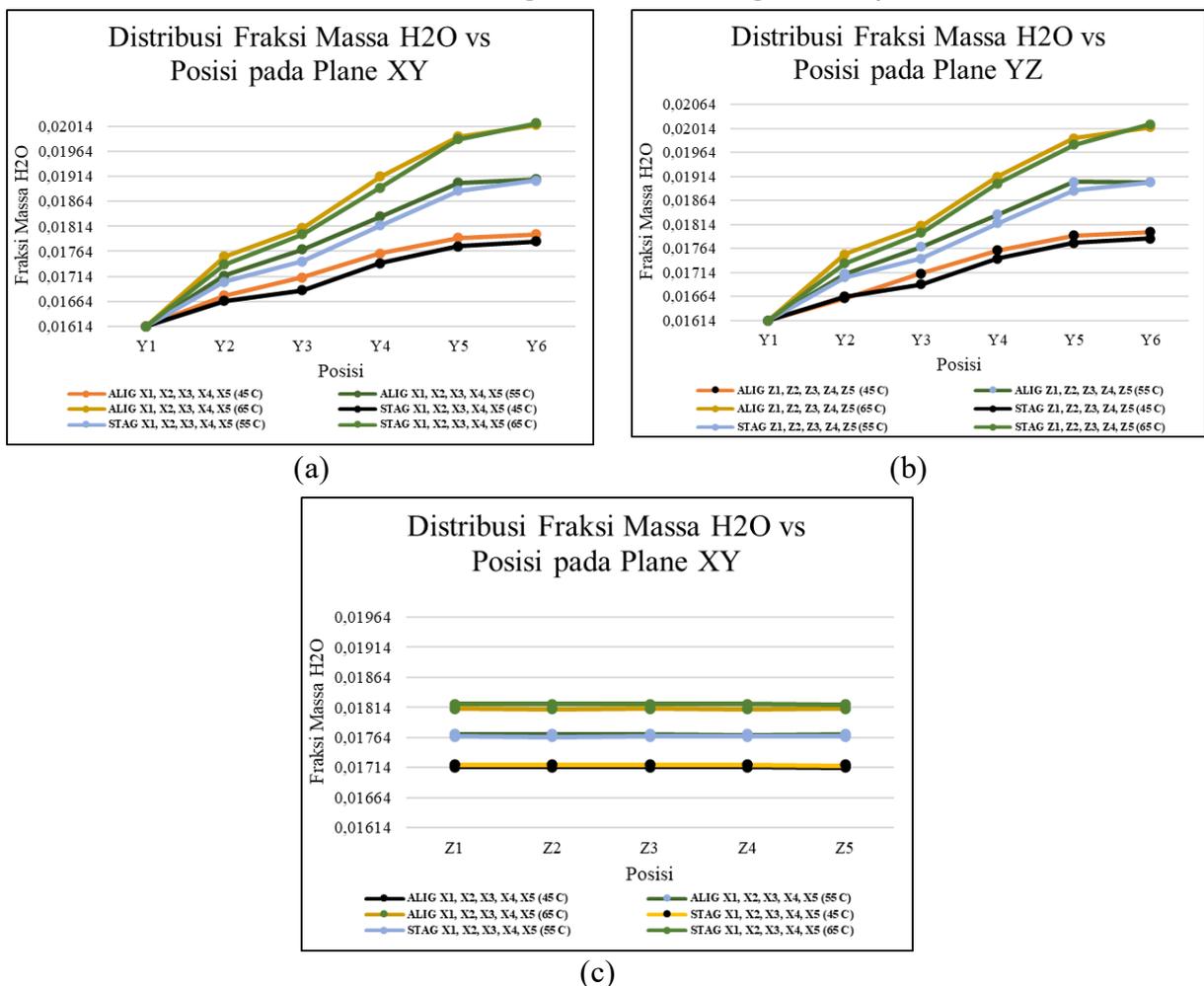


Gambar 4.34 Grafik Distribusi Temperatur pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered* (a) *Plane XY*, (b) *Plane YZ*, (c) *Plane XZ*

Pada gambar 4.26 menunjukkan data kuantitatif dari gambaran kontur temperatur pada kecepatan *inlet* yang sama yaitu 2,4 m/s dari variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* pada masing-masing temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Dapat terlihat bahwa pada

plane XY dan XZ untuk garis X1, X2, X3, X4, dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama. Hal ini terjadi juga pada plane YZ pada garis Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama pula. Kemudian terdapat kesamaan juga untuk *trendline* pada plane XY dan YZ yaitu mengalami penurunan temperatur udara pengering dari posisi 1-6. Hal ini dikarenakan terjadinya proses perpindahan panas ketika udara pengering melewati susunan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah, sehingga semakin ke atas temperatur udara pengering akan terus berkurang. Dapat dilihat pada grafik bahwa penurunan temperatur pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan, keduanya memiliki *trendline* yang sama dan hampir berhimpitan. Namun apabila ditinjau pada konfigurasi *aligned* memiliki temperatur yang lebih rendah dibandingkan *staggered*, hal ini berarti kandungan fraksi massa H₂O *aligned perforated plate* sedikit lebih banyak daripada *staggered perforated plate*.

- Distribusi Fraksi Massa H₂O dengan Variasi Konfigurasi *Perforated Plate*



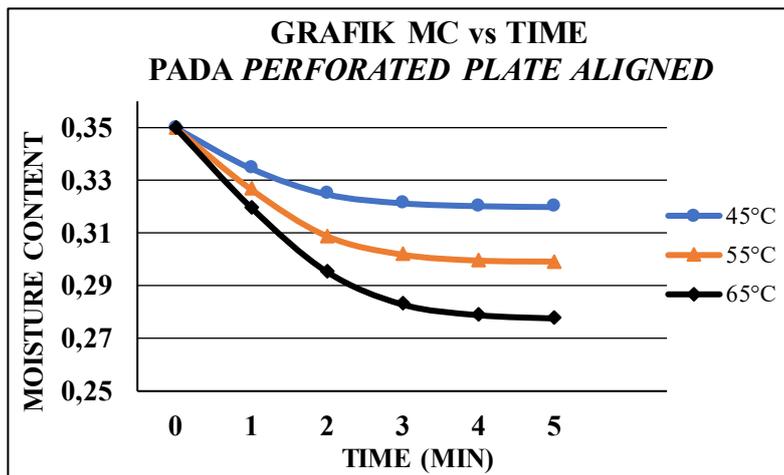
Gambar 4.35 Grafik Distribusi Fraksi Massa H₂O pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered* (a) Plane XY, (b) Plane YZ, (c) Plane XZ

Pada gambar 4.27 menunjukkan data kuantitatif dari gambaran kontur fraksi massa H₂O pada kecepatan *inlet* yang sama yaitu 2,4 m/s dari variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* pada masing-masing temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C. Dapat terlihat bahwa pada plane XY dan XZ untuk garis X1, X2, X3, X4, dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama. Hal ini terjadi juga pada plane YZ pada garis Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 memiliki *trendline* distribusi yang sama

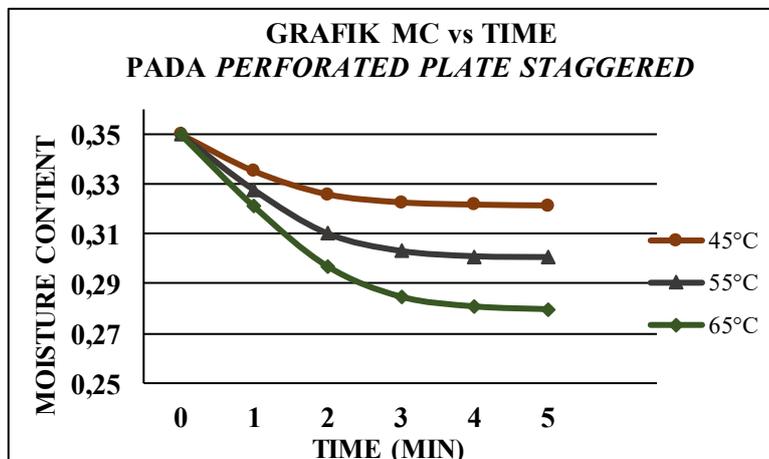
dan berhimpitan karena memiliki posisi persebaran batubara yang sama pula. Kemudian terdapat kesamaan juga untuk *trendline* pada *plane XY* dan *YZ* yaitu mengalami kenaikan fraksi massa H₂O udara pengering dari posisi 1-6. Hal ini dikarenakan terjadinya proses perpindahan massa H₂O, ketika udara pengering melewati susunan batubara maka udara pengering membawa kandungan air pada batubara tersebut, sehingga semakin ke atas jumlah fraksi massa H₂O udara pengering akan terus bertambah. Dapat dilihat pada grafik bahwa kenaikan fraksi massa H₂O pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan, keduanya memiliki *trendline* yang sama dan hampir berhimpitan. Namun apabila ditinjau pada konfigurasi *aligned* memiliki fraksi massa H₂O yang lebih tinggi dibandingkan *staggered*, hal ini berarti kandungan fraksi massa H₂O *aligned perforated plate* sedikit lebih banyak daripada *staggered perforated plate*.

4.5 Analisa Perubahan *Moisture Content* Terhadap Waktu

4.5.1 Analisa Perubahan *Moisture Content* Terhadap Waktu Pada Variasi Temperatur Udara Pengering



Gambar 4.41 Grafik Perubahan *Moisture Content* Terhadap Waktu pada Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*



Gambar 4.38 Grafik Perubahan *Moisture Content* Terhadap Waktu pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*

Telah dilakukan simulasi menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2, dimana hasil simulasi kemudian dicatat dan diolah menggunakan *software excel* yang hasil akhirnya ditampilkan dalam bentuk grafik. Hal ini untuk mengetahui pengaruh temperatur *inlet* udara

pengering terhadap nilai *moisture content* pada batubara setiap menit pengeringannya. Hasil simulasi pada variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C untuk konfigurasi *perforated plate aligned* ditunjukkan pada gambar 4.28. Sedangkan Hasil simulasi pada variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C untuk konfigurasi *perforated plate staggered* ditunjukkan pada gambar 4.29. Dari keseluruhan grafik, didapatkan bahwa *moisture content* batubara menunjukkan *trendline* yang menurun seiring dengan berjalannya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan massa H₂O yang terjadi dari batubara menuju ke udara pengering yang dinamakan proses pengeringan. Proses perpindahan massa H₂O ini dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan massa jenis air *saturated* pada batubara dan udara pengering. Dalam proses pengeringan ini mengakibatkan berkurangnya kadar air pada batubara, sehingga *moisture content* batubara akan menurun. Dapat dilihat pada grafik bahwa penurunan *moisture content* yang signifikan terjadi pada menit ke-1 sampai menit ke-2, namun pada pengeringan menit ke-3 sampai menit ke-5 penurunan *moisture content*-nya sudah tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan jumlah kadar air yang terdapat pada batubara semakin sedikit akibat proses perpindahan massa yang terjadi pada menit – menit awal pengeringan sehingga proses perpindahan massa pun semakin kecil. Pada menit akhir, nilai *relative humidity* mencapai nilai yang hampir sama dengan nilai *relative humidity* pada sisi *inlet drying chamber* akibat jumlah kadar air yang terbawa oleh udara pengering sangat sedikit sehingga proses perpindahan massa yang terjadi juga sangat kecil. Oleh karena itu, nilai *drying rate* juga akan menurun yang pada akhirnya menyebabkan penurunan *moisture content* yang semakin kecil pula pada menit-menit terakhir.

Pengeringan terbaik merupakan hasil pengeringan dengan batubara yang memiliki nilai *moisture content* paling rendah. Hasil simulasi pada konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* menunjukkan pengaruh temperatur *inlet* yang sama pada penurunan *moisture content* batubara. Dimana selama 5 menit pengeringan, nilai *moisture content* paling rendah dicapai oleh variasi temperatur udara pengering 65°C dengan nilai *moisture content* sebesar 27,75% untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan 27,97% untuk konfigurasi *perforated plate staggered*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah kedua dicapai oleh variasi temperatur udara pengering 55°C dengan nilai *moisture content* sebesar 29,95% untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan 30,10% untuk konfigurasi *perforated plate staggered*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah ketiga dicapai oleh variasi temperatur udara pengering 45°C dengan nilai *moisture content* sebesar 32,02% untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan 32,17% untuk konfigurasi *perforated plate staggered*.

Berdasarkan teori yang ada, nilai koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi nilai laju perpindahan massa. Nilai koefisien perpindahan massa berbanding lurus dengan nilai delta *moisture content* batubara terhadap waktu pengeringan sehingga ketika nilai perpindahan massa meningkat, maka akan diikuti dengan peningkatan laju perpindahan massa. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut.

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

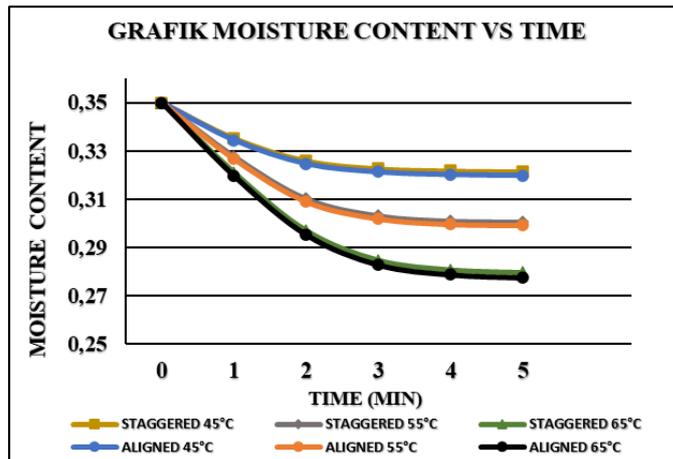
$$\Delta MC = \frac{n_A \times t}{m_{batubara}}$$

Selain itu, semakin tinggi temperatur maka akan semakin turun nilai *relative humidity* pada udara pengering dan kapasitas kandungan uap air dalam udara akan semakin besar sebelum terjadi kejenuhan. *Relative humidity* yang rendah akan menyebabkan transfer panas dan massa dari batubara ke udara semakin besar dan energi panas dalam udara pengering mampu menguapkan molekul-molekul air yang ada pada permukaan batubara. Sehingga *moisture content* pada batubara akan semakin berkurang dengan cepat. Semakin lama proses pengeringan berlangsung, selisih temperatur udara pengering dengan temperatur batubara mulai berkurang. Dimana temperatur batubara mulai mendekati temperatur udara pengering

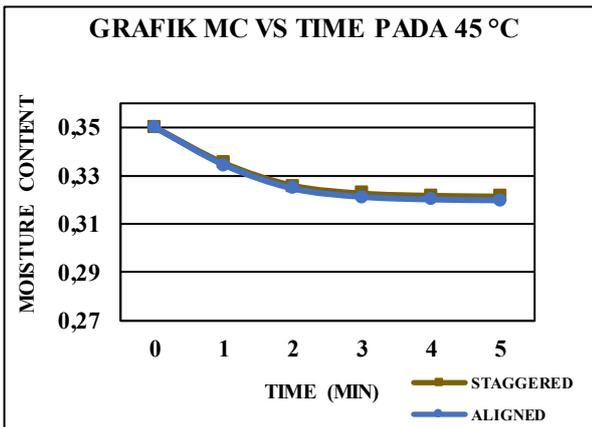
akibat pengeringan yang berjalan secara kontinu. Pengeringan akan berhenti ketika nilai temperatur dan *moisture content* batubara mendekati udara pengering.

Dari hasil perubahan *moisture content* terhadap waktu pada variasi temperatur udara pengering terhadap konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*, dapat disimpulkan bahwa temperatur *inlet* udara pengering memiliki pengaruh terhadap penurunan nilai *moisture content* pada batubara. Urutan penurunan *moisture content* selama 5 menit pengeringan dari yang paling baik hingga yang paling buruk adalah temperatur udara pengering 65°C, 55°C, dan 45°C. Sehingga dari hasil simulasi pengeringan sesuai dengan teori yang ada.

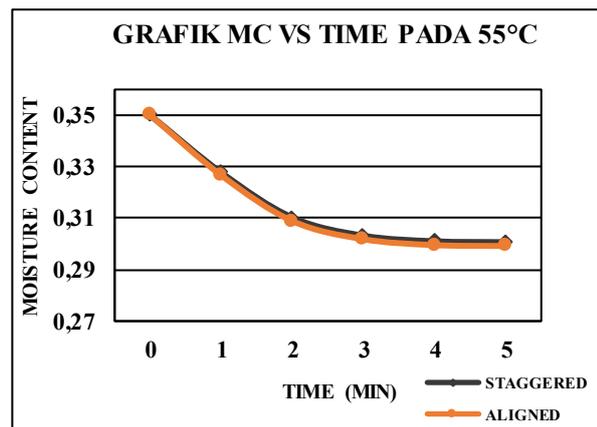
4.5.2 Analisa Perubahan *Moisture Content* Terhadap Waktu Pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate*



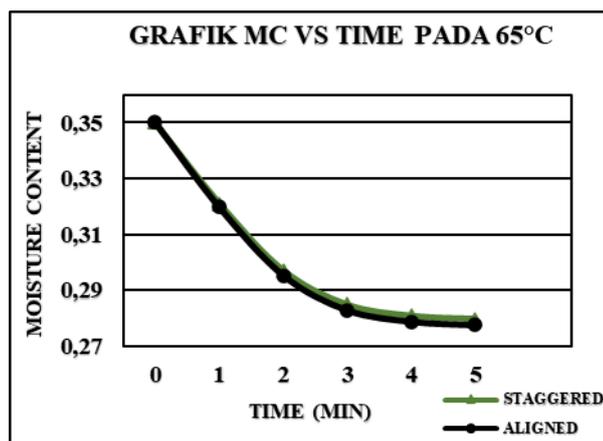
Gambar 4.44 Grafik Perubahan *Moisture Content* Terhadap Waktu pada Konfigurasi *Perforated Plate Aligned* dan *Staggered*



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.47 Grafik Perubahan *Moisture Content* Terhadap Waktu pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate* pada Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2, dimana hasil simulasi dicatat dan diolah menggunakan *software excel* yang hasil akhirnya ditampilkan dalam bentuk grafik 4.30 dan 4.31 di atas. Tujuannya yaitu untuk mengetahui pengaruh konfigurasi *perforated plate* terhadap nilai *moisture content* pada batubara setiap menit pengeringannya. Hasil simulasi pada variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* ditunjukkan pada gambar 4.30. Sedangkan untuk hasil simulasi pada variasi konfigurasi *perforated plate* temperatur 45°C ditunjukkan pada gambar 4.31 (a), temperatur 55°C ditunjukkan pada gambar 4.31 (b), dan temperatur 65°C ditunjukkan pada gambar 4.31 (c).

Dari keseluruhan grafik, didapatkan bahwa *moisture content* batubara menunjukkan *trendline* yang menurun seiring dengan berjalannya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan massa H₂O yang terjadi dari batubara menuju ke udara pengering yang dinamakan proses pengeringan. Proses perpindahan massa H₂O ini dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan massa jenis air *saturated* pada batubara dan udara pengering. Dalam proses pengeringan ini mengakibatkan berkurangnya kadar air pada batubara, sehingga *moisture content* batubara akan menurun. Dapat dilihat pada grafik bahwa penurunan *moisture content* yang signifikan terjadi pada menit ke-1 sampai menit ke-2, namun pengeringan pada menit ke-3 sampai menit ke-5 penurunan *moisture content*-nya sudah tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan terjadinya penurunan kadar air pada batubara, sehingga menyebabkan massa jenis air *saturated* pada batubara mendekati udara pengering, sehingga memiliki selisih yang semakin kecil. Oleh karena itu, nilai *drying rate* juga akan menurun yang pada akhirnya menyebabkan penurunan *moisture content* yang semakin kecil pula pada menit-menit terakhir.

Pengeringan terbaik merupakan hasil pengeringan dengan batubara yang memiliki nilai *moisture content* paling rendah. Hasil simulasi pada konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* menunjukkan pengaruh temperatur *inlet* yang sama pada penurunan *moisture content* batubara. Dimana selama 5 menit pengeringan, nilai *moisture content* paling rendah dicapai oleh variasi temperatur udara pengering 65°C dengan nilai *moisture content* sebesar 27,75% untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan 27,97% untuk konfigurasi *perforated plate staggered*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah kedua dicapai oleh variasi temperatur udara pengering 55°C dengan nilai *moisture content* sebesar 29,95% untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan 30,10% untuk konfigurasi *perforated plate staggered*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah ketiga dicapai oleh variasi temperatur udara

pengering 45°C dengan nilai *moisture content* sebesar 32,02% untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan 32,17% untuk konfigurasi *perforated plate staggered*.

Berdasarkan teori yang ada, nilai koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi nilai laju perpindahan massa. Nilai koefisien perpindahan massa berbanding lurus dengan nilai delta *moisture content* batubara terhadap waktu pengeringan sehingga ketika nilai perpindahan massa meningkat, maka akan diikuti dengan peningkatan laju perpindahan massa.

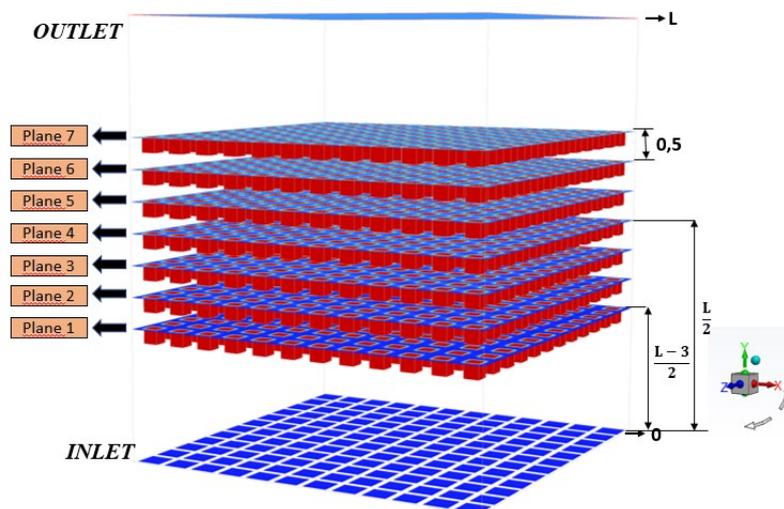
$$n_A = h_m \times A \times (\rho_{H_2O,coal} - \rho_{H_2O,inlet})$$

$$\Delta MC = \frac{n_A \times t}{m_{batubara}}$$

Semakin lama proses pengeringan berlangsung, selisih temperatur udara pengering dengan temperatur batubara mulai berkurang. Dimana temperatur batubara mulai mendekati temperatur udara pengering akibat pengeringan yang berjalan secara kontinu. Pengeringan akan berhenti ketika nilai temperatur dan *moisture content* batubara mendekati udara pengering.

Dari hasil perubahan *moisture content* terhadap waktu pada variasi konfigurasi *perforated plate*, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi *perforated plate* baik *aligned* maupun *staggered* tidak memiliki pengaruh terhadap proses pengeringan batubara dikarenakan pada kedua konfigurasi penurunan nilai *moisture content* pada batubara tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Hal ini dikarenakan luasan dari *flow open area* dari kedua *perforated plate* tersebut sama.

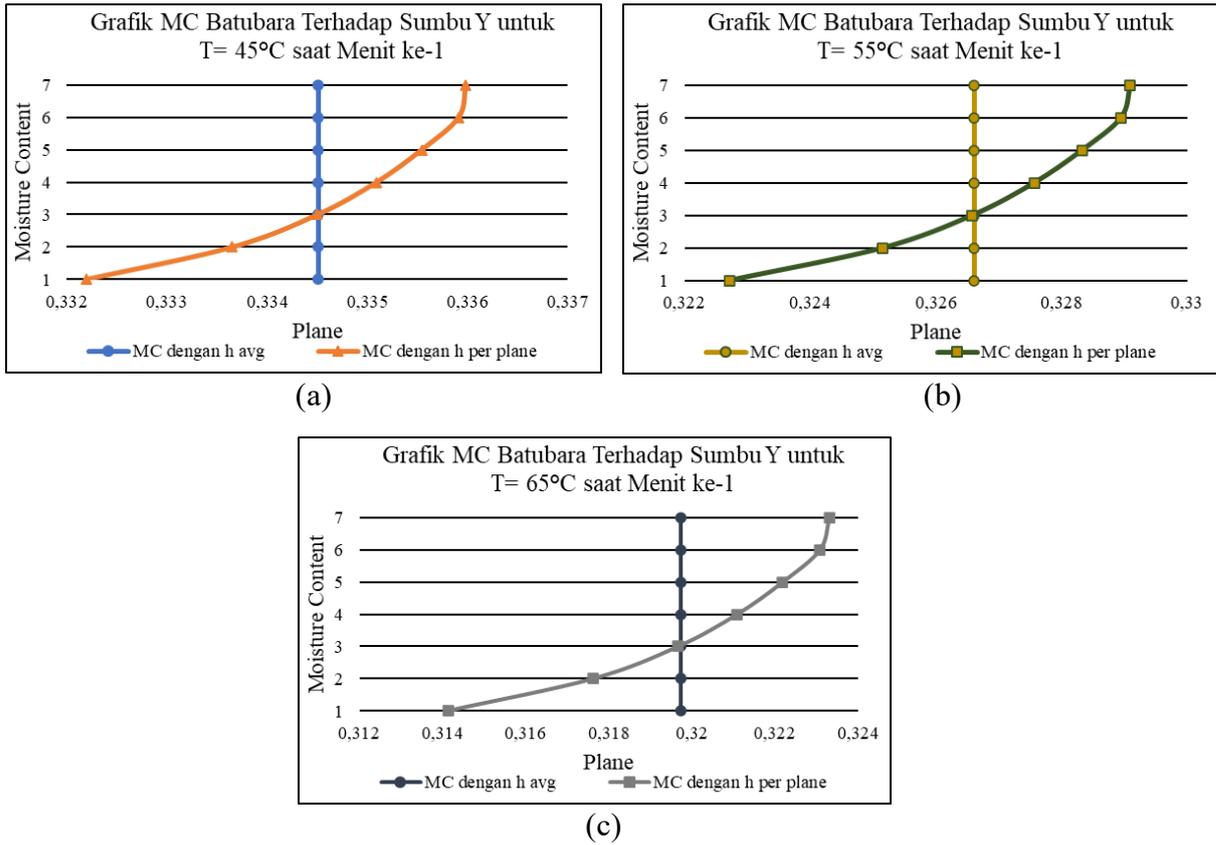
4.5.3 Analisa Perubahan *Moisture Content* terhadap Sumbu Y



Gambar 4.50 Posisi *Plane* Batubara pada Sumbu Y

Di dalam *drying chamber* tersusun batubara secara merata dengan tingkat susunan sebanyak 7 ke arah sumbu Y. Persebaran batubara di dalam *drying chamber* baik konfigurasi *aligned* dan *staggered perforated plate* yaitu sama. Guna mengetahui besar penurunan nilai *moisture content* batubara pada tiap level searah sumbu Y maka dilakukan pengambilan variabel perhitungan seperti nilai koefisien konveksi pada setiap *plane* batubaranya, kemudian data diolah dan dihitung besar penurunan *moisture content* pada masing-masing *plane*-nya.

a. Pada Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*

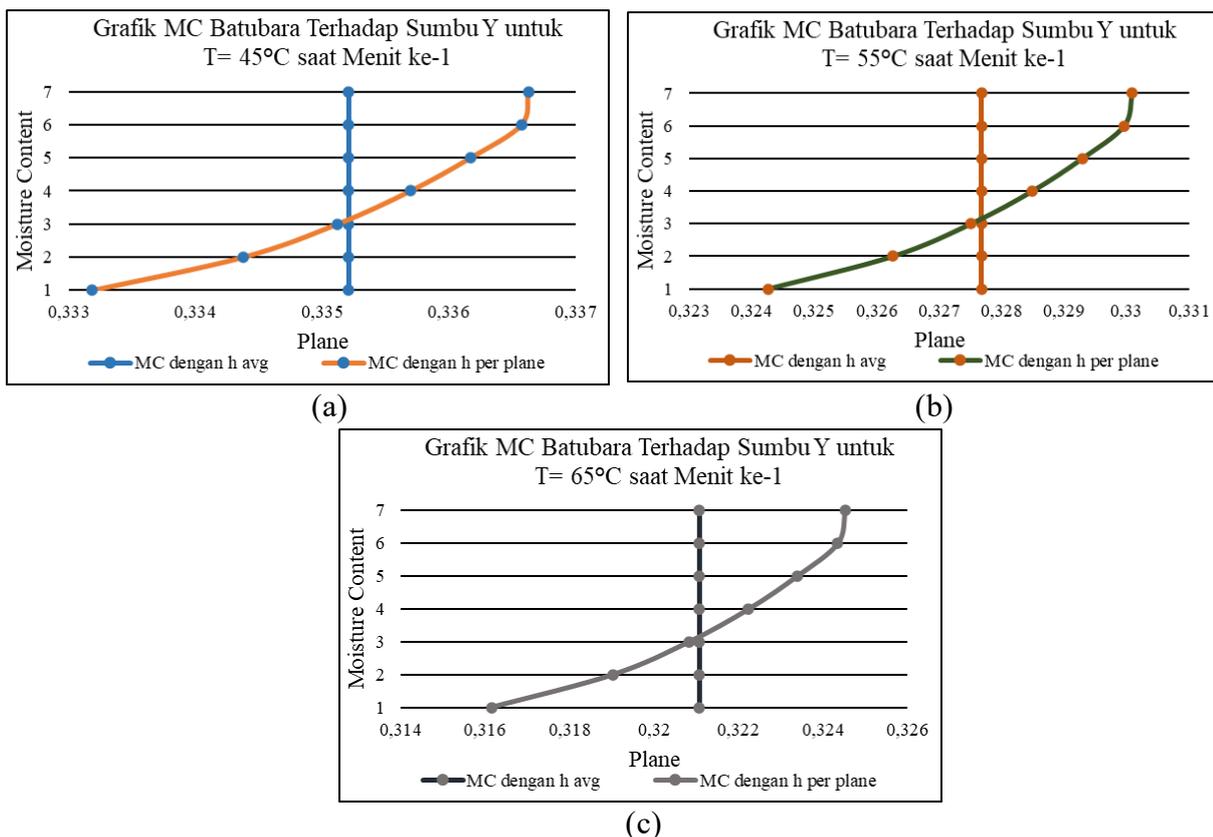


Gambar 4.53 Grafik *Moisture Content* Terhadap Sumbu Y pada *Aligned Perforated Plate* saat menit ke-1 pada Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* ANSYS FLUENT 19.2, dimana hasil simulasi dicatat dan diolah menggunakan *software excel* yang hasil akhirnya ditampilkan dalam bentuk grafik. Tujuannya yaitu untuk mengetahui bagaimana nilai *moisture content* pada batubara pada setiap plane-nya dan dibandingkan dengan nilai *moisture content* apabila menggunakan *h average*. Hasil grafik *moisture content* batubara terhadap sumbu Y pada variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C untuk konfigurasi *perforated plate aligned* saat menit ke-1 ditunjukkan pada gambar 4.33 di atas. Dari keseluruhan grafik, didapatkan bahwa untuk nilai *moisture content* batubara dengan menggunakan perhitungan *h per plane* pada menit pengeringan pertama menunjukkan *trendline* yang naik seiring dengan tingkatan *plane* batubara pada sumbu Y. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan massa H₂O yang terjadi dari batubara menuju ke udara pengering yang dinamakan proses pengeringan. Dimana untuk *plane* batubara ke-1 memiliki nilai *moisture content* yang lebih rendah dibanding *plane* yang lainnya yaitu sebesar 33,21% pada temperatur 45°C, 32,27% pada temperatur 55°C, dan 31,41% pada temperatur 65°C. Hal ini dikarenakan udara pengering yang melewati batubara *plane* pertama mengalami proses perpindahan panas dan massa yang besar. Dimana kadar air dalam udara pengering masih sedikit sehingga kemampuan menyerap *moisture content* batubara lebih besar. Selain itu, ketika udara pengering dengan temperatur yang tinggi melewati batubara pada *plane* pertama, dimana batubara memiliki temperatur sangat rendah menyebabkan selisih temperatur antara udara pengering dan batubara semakin besar. Sehingga terjadi proses perpindahan panas yang besar pula. Kemudian apabila diamati semakin menuju batubara *plane 7* kandungan air batubara tidak terserap banyak oleh udara pengering, sehingga menyebabkan *moisture content* batubara pada *plane 7* masih banyak sebesar 33,59% pada temperatur 45°C, 32,91% pada

temperatur 55°C, dan 32,33% pada temperatur 65°C. Hal ini dikarenakan udara pengering semakin menuju ke *outlet*, maka kadar airnya semakin banyak dikarenakan akumulasi dari penyerapan kadar air batubara pada *plane* sebelumnya. Sehingga kemampuan udara pengering dalam menyerap *moisture content* batubara pada *plane-plane* akhir semakin berkurang. Kemudian apabila dibandingkan nilai *moisture content* dengan menggunakan *h average* dan *h per plane* baik pada temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C dapat dilihat bahwa, *moisture content* dengan *h average* didapatkan *range* yang sama dengan *moisture content* dengan *h per plane* yaitu pada *plane* 3 sebesar 33,45% untuk temperatur 45°C, 32,65% untuk temperatur 55°C, dan 31,96% untuk temperatur 65°C. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *moisture content* dengan menggunakan nilai *h per plane* memiliki perbedaan nilai pada setiap ketinggiannya. Semakin rendah *plane* batubara maka penurunan nilai *moisture content*-nya semakin besar, namun semakin tinggi posisi *plane* batubara maka *moisture content* yang terserap oleh udara pengering sedikit.

b. Pada Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*



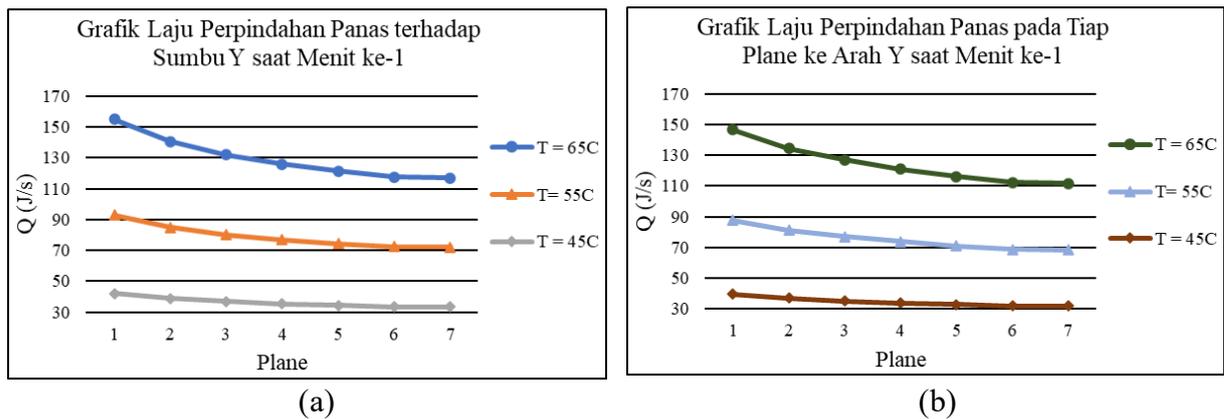
Gambar 4. 54 Grafik *Moisture Content* Terhadap Sumbu Y pada *Staggered Perforated Plate* saat Menit ke-1 pada Variasi Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Selanjutnya yaitu hasil grafik *moisture content* batubara terhadap sumbu Y pada variasi temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C untuk konfigurasi *perforated plate staggered* saat menit ke-1 ditunjukkan pada gambar 4.34 di atas. Terdapat kesamaan *trendline moisture content* seperti pada konfigurasi *aligned perforated plate*, dimana dari keseluruhan grafik didapatkan bahwa untuk nilai *moisture content* batubara dengan menggunakan perhitungan *h per plane* pada menit pengeringan pertama menunjukkan *trendline* yang naik seiring dengan tingkatan *plane* batubara pada sumbu Y. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan massa H₂O yang terjadi dari batubara menuju ke udara pengering yang dinamakan proses pengeringan. Dimana untuk *plane* batubara ke-1 memiliki nilai *moisture content* yang lebih rendah dibanding *plane* yang lainnya yaitu

sebesar 33,31% pada temperatur 45°C, 32,42% pada temperatur 55°C, dan 31,61% pada temperatur 65°C. Hal ini dikarenakan udara pengering yang melewati batubara *plane* pertama mengalami proses perpindahan panas dan massa yang besar. Dimana kadar air dalam udara pengering masih sedikit sehingga kemampuan menyerap *moisture content* batubara lebih besar. Selain itu, ketika udara pengering dengan temperatur yang tinggi melewati batubara pada *plane* pertama, dimana batubara memiliki temperatur sangat rendah menyebabkan selisih temperatur antara udara pengering dan batubara semakin besar. Sehingga terjadi proses perpindahan panas yang besar pula. Kemudian apabila diamati semakin menuju batubara *plane* 7 kandungan air batubara tidak terserap banyak oleh udara pengering, sehingga menyebabkan *moisture content* batubara pada *plane* 7 masih banyak sebesar 33,53% pada temperatur 45°C, 32,79% pada temperatur 55°C, dan 32,45% pada temperatur 65°C. Hal ini dikarenakan udara pengering semakin menuju ke *outlet*, maka kadar airnya semakin banyak dikarenakan akumulasi dari penyerapan kadar air batubara pada *plane* sebelumnya. Sehingga kemampuan udara pengering dalam menyerap *moisture content* batubara pada *plane-plane* akhir semakin berkurang. Kemudian apabila dibandingkan nilai *moisture content* dengan menggunakan *h average* dan *h per plane* baik pada temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C dapat dilihat bahwa, *moisture content* dengan *h average* didapatkan *range* yang sama dengan *moisture content* dengan *h per plane* yaitu pada *plane* 3 sebesar 33,51% untuk temperatur 45°C, 32,75% untuk temperatur 55°C, dan 32,08% untuk temperatur 65°C. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *moisture content* dengan menggunakan nilai *h per plane* memiliki perbedaan nilai pada setiap ketinggiannya. Semakin rendah *plane* batubara maka penurunan nilai *moisture content*-nya semakin besar, namun semakin tinggi posisi *plane* batubara maka *moisture content* yang terserap oleh udara pengering sedikit.

4.6 Analisa Laju Perpindahan Panas dan Massa terhadap Sumbu Y

4.6.1 Analisa Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y



Gambar 4.55 Grafik Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada konfigurasi *perforated plate* (a) *Aligned* (b) *Staggered*

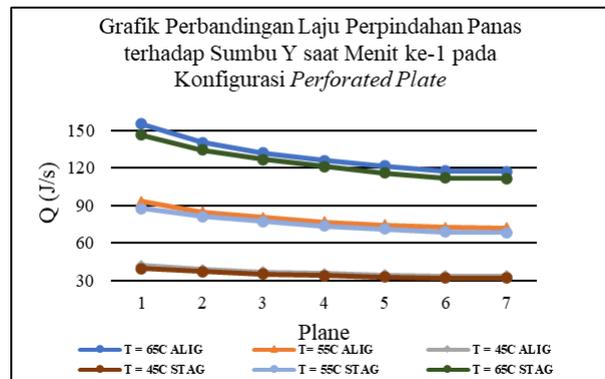
Gambar 4.35 di atas merupakan grafik laju perpindahan panas terhadap sumbu Y saat menit ke-1 untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Pada keseluruhan grafik didapatkan bahwa terjadi penurunan laju perpindahan panas seiring dengan kenaikan *plane* batubara sepanjang sumbu Y. Hal ini dikarenakan pada *plane* batubara ke-1, ketika udara pengering dengan temperatur yang tinggi melewati susunan batubara, dimana batubara memiliki temperatur sangat rendah sehingga menyebabkan selisih temperatur antara udara pengering dan batubara semakin besar. Sehingga pada *plane* ke-1 terjadi proses perpindahan panas yang paling besar dibanding *plane* lainnya. Kemudian pada *plane* 7 batubara, terlihat penurunan laju perpindahan panas sangat kecil, hal ini dikarenakan temperatur udara pengering

semakin menuju sisi *outlet* semakin menurun, sehingga selisih dari temperatur udara pengering dengan batubara juga semakin mengecil yang mengakibatkan proses perpindahan panasnya kecil.

Proses Perpindahan panas terjadi antara batubara dengan udara pengering sesuai berdasarkan rumus berikut

$$q = h \cdot A \cdot (T_{inlet} - T_{coal})$$

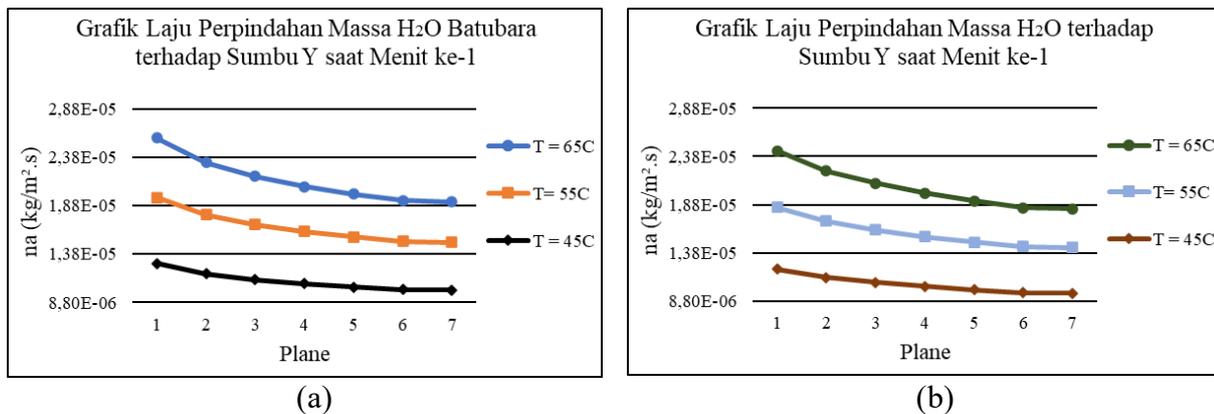
tentunya nilai q bertambah besar karena nilai T_{inlet} semakin besar yang mengakibatkan nilai ΔT juga semakin besar. Sehingga dari ketiga variasi temperatur nilai q terbesar pada 65°C dan yang terkecil pada variasi 45°C . Pada proses iterasi terakhir memiliki nilai ΔT yang paling rendah, sehingga terjadi perpindahan panas yang kecil.



Gambar 4.56 Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada Konfigurasi *Perforated Plate*

Gambar 4.36 di atas merupakan grafik perbandingan laju perpindahan panas terhadap sumbu y saat menit ke-1 pada konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Pada keseluruhan grafik didapatkan bahwa baik temperatur 45°C , 55°C , dan 65°C antara *aligned* dan *staggered perforated plate* berhimpitan, sehingga besar laju perpindahan panas pada tiap variasi temperatur pada setiap *plane*-nya yaitu hampir sama. Apabila diamati laju perpindahan panas konfigurasi *aligned perforated plate* sedikit lebih besar dibandingkan *staggered perforated plate*. Namun dikarenakan perbedaan yang tidak signifikan ini, maka dapat disimpulkan konfigurasi *perforated plate* tidak mempengaruhi proses perpindahan panas pada pengeringan batubara.

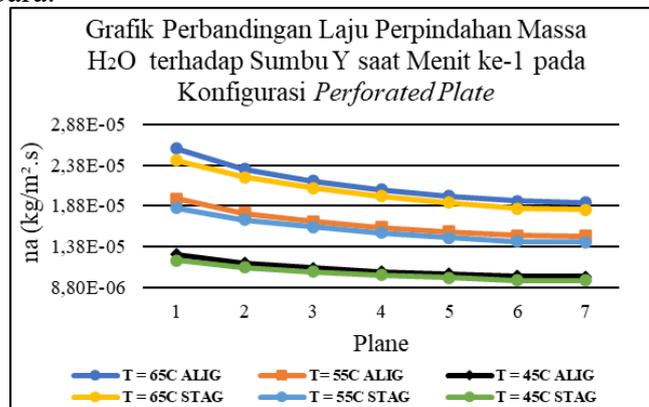
4.6.2 Analisa Laju Perpindahan Massa terhadap Sumbu Y



Gambar 4.57 Grafik Laju Perpindahan Massa terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada konfigurasi *perforated plate* (a) *Aligned* (b) *Staggered*

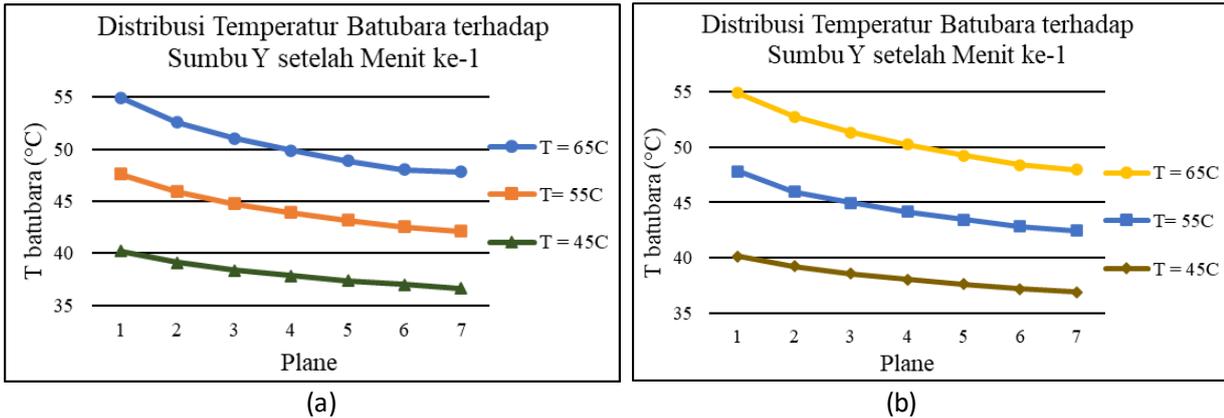
Gambar 4.37 di atas merupakan grafik laju perpindahan massa terhadap sumbu Y saat menit ke-1 untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Pada keseluruhan grafik didapatkan bahwa terjadi penurunan laju perpindahan massa seiring dengan kenaikan *plane* batubara sepanjang sumbu Y. Hal ini dikarenakan udara pengering yang melewati batubara *plane* pertama memiliki kadar air dalam udara pengering masih sedikit sehingga kemampuan menyerap *moisture content* batubara lebih besar, sehingga nilai perpindahan massanya besar. Pada grafik terlihat bahwa penurunan paling signifikan yaitu pada *plane-plane* awal batubara yaitu pada *plane* 1 sampai 5, kemudian pada *plane* 5 sampai 7 laju perpindahan massanya hampir konstan. Hal ini dikarenakan semakin menuju batubara *plane* 7, kadar air dalam udara pengering sudah banyak akibat akumulasi penyerapan *moisture content* pada *plane-plane* sebelumnya, sehingga kemampuan untuk menyerap *moisture content* batubara berkurang, dan mengakibatkan laju perpindahan massa berkurang.

Gambar 4.38 di bawah merupakan grafik perbandingan laju perpindahan massa terhadap sumbu y saat menit ke-1 pada konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Pada keseluruhan grafik didapatkan bahwa baik temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C antara *aligned* dan *staggered perforated plate* berhimpitan, sehingga besar laju perpindahan massa pada tiap variasi temperatur pada setiap *plane*-nya yaitu hampir sama. Apabila diamati laju perpindahan massa konfigurasi *aligned perforated plate* sedikit lebih besar dibandingkan *staggered perforated plate*. Namun dikarenakan perbedaan yang tidak signifikan ini, maka dapat disimpulkan konfigurasi *perforated plate* tidak mempengaruhi proses perpindahan massa pada pengeringan batubara.



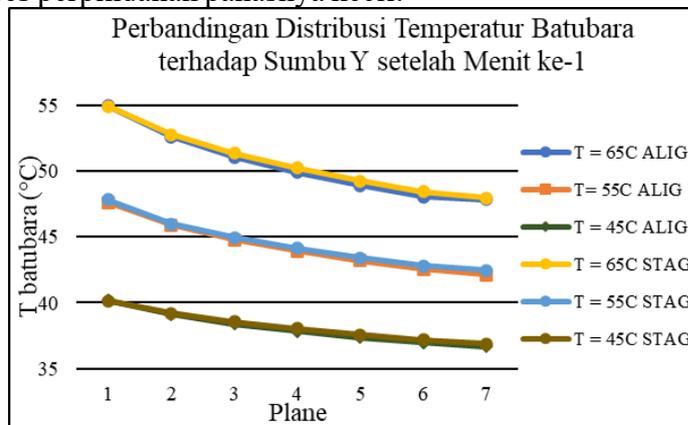
Gambar 4.58 Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Panas terhadap Sumbu Y saat Menit ke-1 pada Konfigurasi *Perforated Plate*

4.7 Analisa Distribusi Temperatur Batubara terhadap Sumbu Y



Gambar 4.61 Distribusi Temperatur Batubara terhadap Sumbu Y setelah Menit ke-1 pada konfigurasi (a) *perforated plate aligned* (b) *perforated plate staggered*

Gambar 4.39 di atas merupakan distribusi temperatur batubara terhadap sumbu Y setelah menit ke-1 untuk konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Pada keseluruhan grafik didapatkan bahwa terjadi penurunan temperatur seiring dengan kenaikan *plane* batubara sepanjang sumbu Y. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan massa H₂O yang terjadi dari batubara menuju ke udara pengering yang dinamakan proses pengeringan. Hal ini dikarenakan proses perpindahan panas yang terjadi dari udara pengering yang memiliki temperatur lebih tinggi dibanding batubara. Pada *plane* batubara ke-1, ketika udara pengering dengan temperatur yang tinggi melewati batubara, dimana batubara memiliki temperatur sangat rendah menyebabkan selisih temperatur antara udara pengering dan batubara semakin besar. Sehingga terjadi proses perpindahan panas yang besar pula, yang mengakibatkan penurunan temperatur pada plane 1 lebih besar dibanding plane lainnya. Kemudian pada *plane* 7 batubara, terlihat penurunan temperatur batubara sangat kecil, hal ini dikarenakan temperatur udara pengering semakin menuju sisi *outlet*, semakin menurun dikarenakan proses perpindahan panas, sehingga selisih dari temperatur udara pengering dengan batubara juga semakin mengecil yang mengakibatkan proses perpindahan panasnya kecil.



Gambar 4.64 Perbandingan Distribusi Temperatur Batubara terhadap Sumbu Y setelah Menit ke-1 Pengeringan pada Konfigurasi *Perforated Plate*

Gambar 4.40 di atas merupakan perbandingan distribusi temperatur batubara terhadap sumbu Y setelah menit ke-1 pengeringan pada konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered*. Pada keseluruhan grafik didapatkan bahwa baik temperatur 45°C, 55°C, dan 65°C grafik antara *aligned* dan *staggered perforated plate* berhimpitan, sehingga besar penurunan temperatur batubara pada tiap variasi temperatur pada setiap *plane*-nya yaitu hampir sama. Oleh

karena itu konfigurasi *perforated plate* tidak mempengaruhi proses pengeringan batubara. Pada keseluruhan grafik terjadi penurunan temperatur seiring dengan kenaikan *plane* batubara sepanjang sumbu Y. Hal ini dikarenakan proses perpindahan panas yang terjadi dari udara pengering yang memiliki temperatur lebih tinggi dibanding batubara.

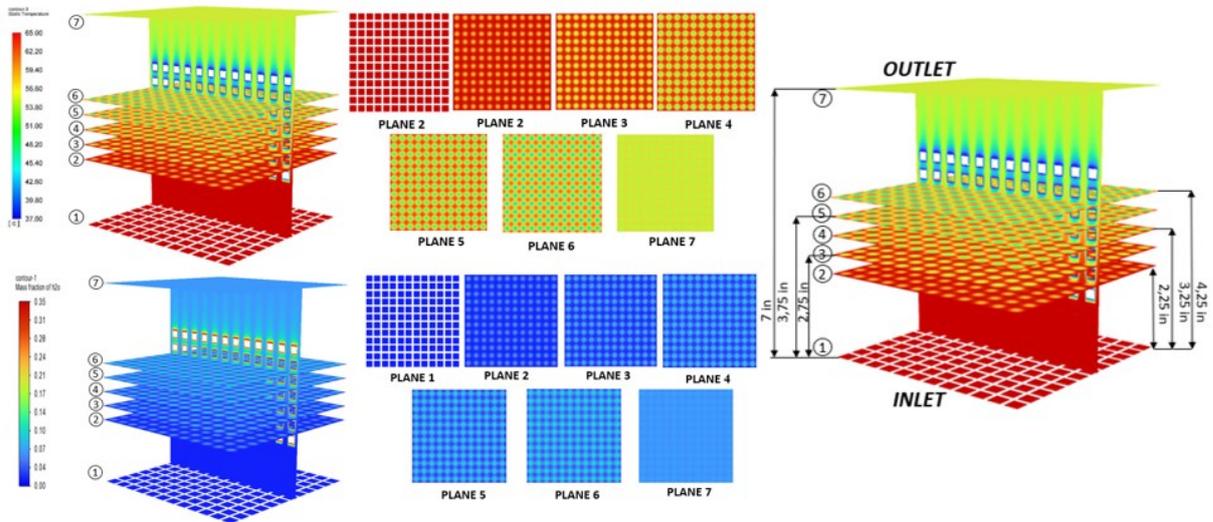
Proses Perpindahan panas terjadi antara batubara dengan udara pengering sesuai berdasarkan rumus berikut

$$q = h \cdot A \cdot (T_{inlet} - T_{coal})$$

tentunya nilai q bertambah besar karena nilai T_{inlet} semakin besar yang mengakibatkan nilai ΔT juga semakin besar. Sehingga dari ketiga variasi temperatur nilai q terbesar pada 65°C dan yang terkecil pada variasi 45°C . Pada proses iterasi terakhir memiliki nilai ΔT yang paling rendah, sehingga terjadi perpindahan panas yang kecil.

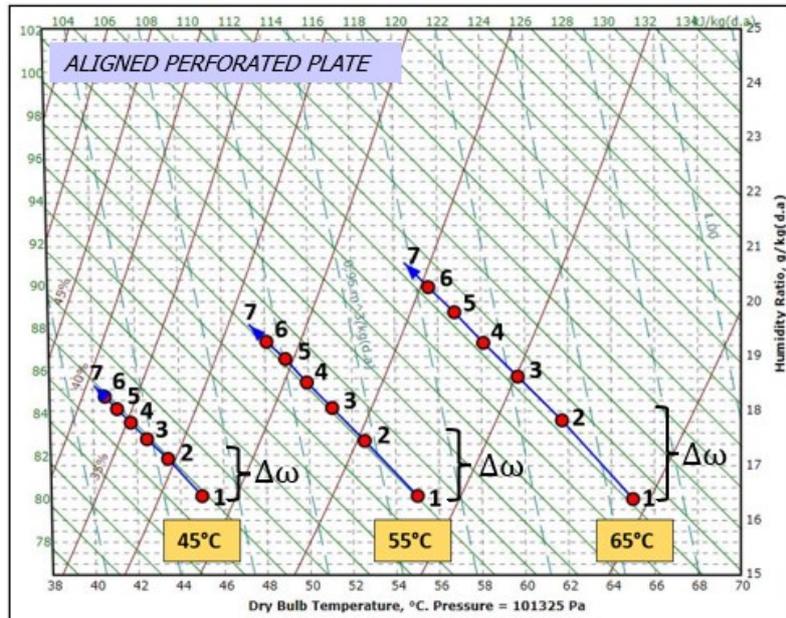
4.8 Analisa *Psychrometric Chart*

Data yang digunakan sebagai *input* dalam *psychrometric chart* didapatkan dari hasil *running* dalam *software* ANSYS FLUENT 19.2 yang diperoleh dari beberapa *plane* di sepanjang *drying chamber*. Berikut adalah posisi *plane* pengambilan data pada ruang pengering batubara.

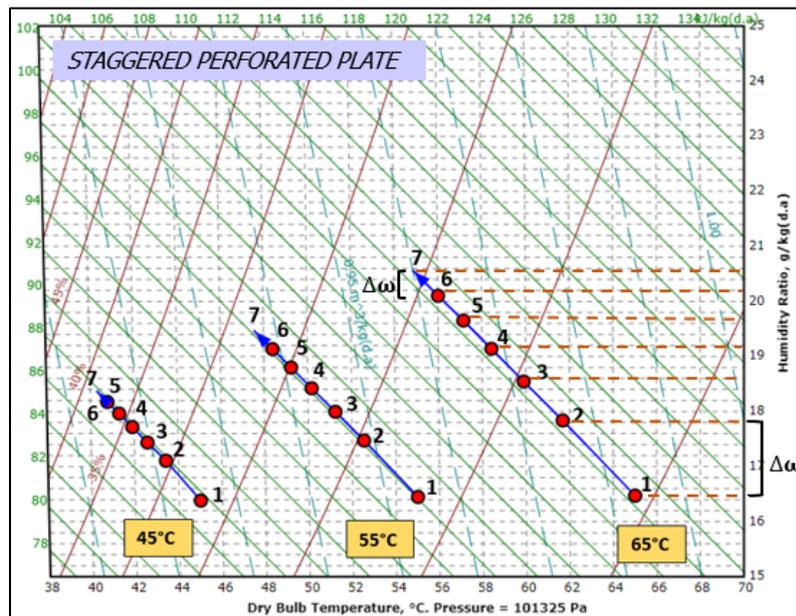


Gambar 4.67 Posisi *Plane* Pengambilan Data *Input Psychrometric Chart*

4.8.1 Analisa Karakteristik Udara Pengering pada *Psychrometric Chart* dengan Variasi Temperatur



Gambar 4.71 Karakteristik Udara Pengering pada *Psychrometric Chart* untuk Konfigurasi *Aligned Perforated Plate*



Gambar 4.68 Karakteristik Udara Pengering pada *Psychrometric Chart* untuk Konfigurasi *Staggered Perforated Plate*

Setelah didapatkan data temperatur dan *relative humidity* udara pengering pada tiap *plane* yang telah ditentukan dari hasil simulasi Fluent 19.2, maka dilakukan analisis pada *psychrometric chart* untuk mengetahui perubahan kondisi udara pengering pada setiap posisi *plane* tersebut. Plot *psychrometric chart* pada konfigurasi *perforated plate aligned* dapat dilihat pada gambar 4.42. Sedangkan plot *psychrometric chart* pada konfigurasi *perforated plate staggered* dapat dilihat pada gambar 4.43.

Seperti yang telah diketahui, proses pendinginan ataupun pemanasan dapat tergambar dengan perpindahan titik secara horizontal ke kiri atau ke kanan. Sedangkan, proses pelembaban atau pengeringan dapat tergambar dengan perpindahan titik secara vertikal ke atas atau bawah. Terjadinya perpindahan panas dari udara pengering menuju batubara juga perpindahan massa H₂O dari batubara ke udara pengering maka menyebabkan titik kondisi udara pengering akan menuju kiri atas dari titik kondisi *inlet*. Garis yang melintang tersebut merupakan proses pengeringan dimana udara kering masuk melalui *drying chamber*. Titik di sebelah kanan merupakan posisi *inlet*, lalu untuk titik paling kiri merupakan posisi *outlet*. Dapat dilihat bahwa semakin menuju posisi *outlet* memiliki nilai *relative humidity* yang semakin menurun dan temperatur *outlet* semakin naik, sehingga mengakibatkan selisih dari *humidity ratio* semakin kecil. Posisi *inlet* mempunyai temperatur tinggi tetapi *relative humidity* dan *humidity ratio*-nya rendah, namun pada posisi *outlet* mempunyai temperatur yang lebih rendah tetapi *relative humidity* dan *humidity ratio*-nya tinggi. Hal ini dikarenakan proses pengeringan dimana terjadi pendinginan dan H₂O batubara terbawa oleh udara pengering sehingga massa H₂O udara menjadi bertambah. Jika selisih *humidity ratio* semakin kecil maka semakin sedikit kandungan H₂O pada batubara yang ter-evaporasi. Hal ini yang membuat grafik *moisture content* semakin landai menjelang akhir proses.

Berikut adalah proses yang terjadi dalam *psychrometric chart* pada ketiga variasi temperatur di atas.

- Proses 1-2 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah. Dapat dilihat pada temperatur 65°C memiliki penurunan temperatur dan kenaikan nilai *relative humidity* yang lebih besar dibandingkan proses berikutnya, sehingga nilai delta *humidity ratio* pun paling besar. Hal ini dikarenakan kadar air pada udara pengering masih sedikit sehingga mampu menyerap *moisture content* pada batubara lebih besar. Kemudian pada proses setelahnya nilai delta *humidity ratio* akan semakin mengecil, hal ini dikarenakan semakin menuju *outlet* maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang. Disamping itu, pada temperatur 65°C memiliki delta *humidity ratio* yang lebih besar dibanding pada temperatur 45°C, hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur maka akan semakin turun nilai *relative humidity* pada udara pengering dan kapasitas kandungan uap air dalam udara akan semakin besar sebelum terjadi kejenuhan.

- Proses 2-3 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah.

- Proses 3-4 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah.

- Proses 4-5 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah. Namun, peningkatannya lebih kecil dibandingkan dengan

proses sebelumnya karena semakin ke atas maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang.

- Proses 5-6 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara. Namun, peningkatannya lebih kecil dibandingkan dengan proses sebelumnya karena semakin ke atas maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang.

- Proses 6-7 (*cooling* dan *humidifying*)

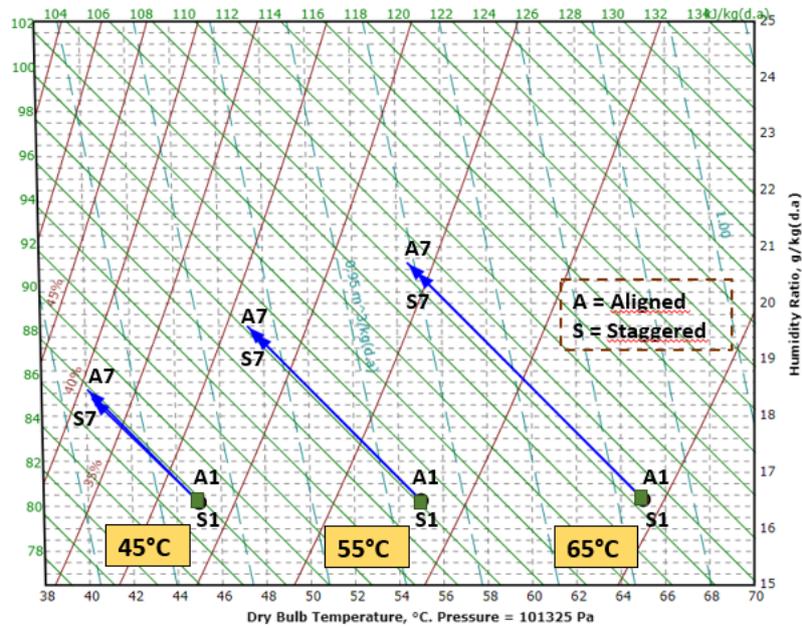
Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara. Namun, peningkatannya sangat kecil dibandingkan dengan proses sebelumnya karena semakin ke atas maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang.

Berdasarkan teori, 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 batubara semakin besar.

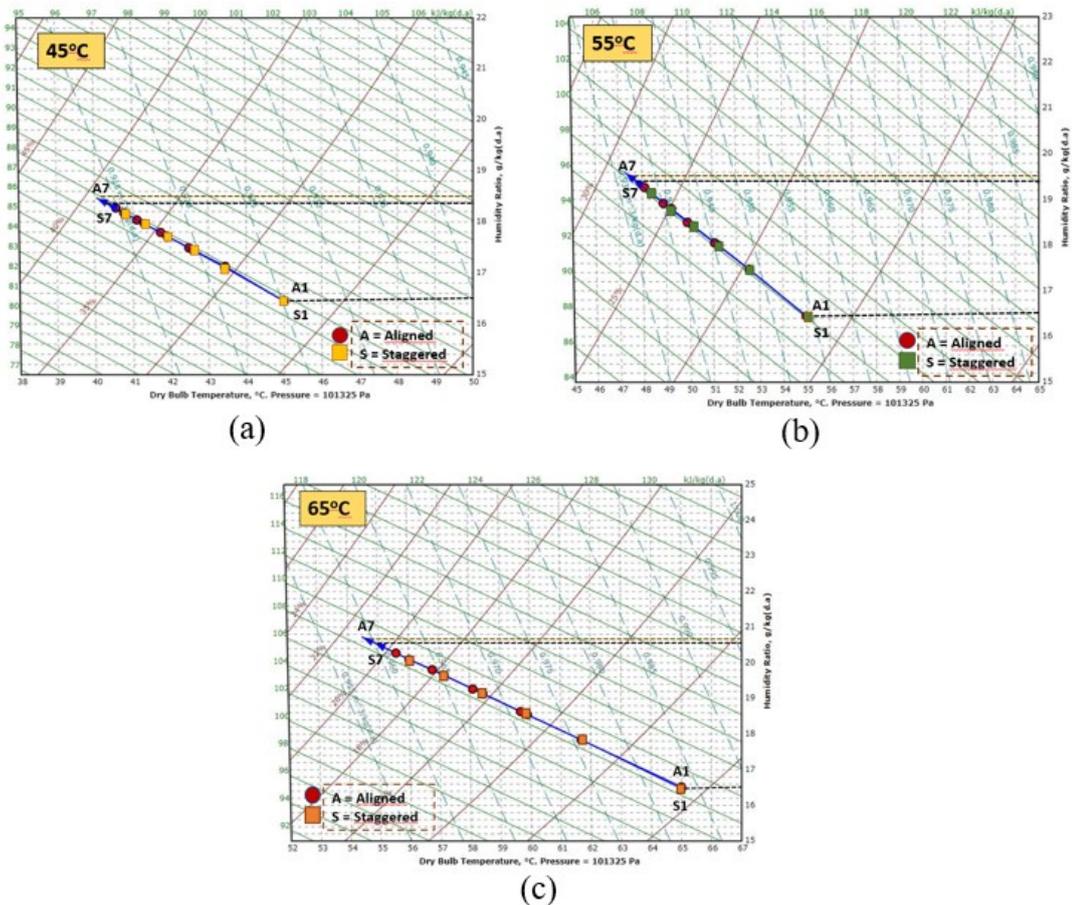
$$Q = h \times A \times (T_{udara} - T_{coal})$$
$$n_A = h_m \times A \times (\rho_{coal} - \rho_{inlet})$$

Temperatur udara pengering 65°C memberikan nilai massa jenis udara yang rendah tapi selisih massa jenis batubara dengan udara akan besar, sehingga memberikan laju perpindahan massa yang besar. Dengan kata lain, temperatur udara pengering 65 °C memiliki laju perpindahan panas sekaligus laju perpindahan massa yang paling besar. Sebaliknya, pada temperatur udara pengering 45°C memiliki laju perpindahan panas dan massa yang paling rendah. Selain itu, semakin tinggi temperatur yang digunakan akan memberikan kapasitas jumlah uap air dalam udara semakin besar, sehingga udara pengering dapat menyerap *moisture* yang terkandung di dalam batubara lebih banyak.

4.8.2 Analisa Karakteristik Udara Pengering pada *Psychrometric Chart* dengan Variasi Konfigurasi *Perforated Plate*



Gambar 4.74 Karakteristik Udara Pengering pada *Psychrometric Chart*



Gambar 4.77 Karakteristik Udara Pengering dalam *Psychrometric Chart* pada Variasi Konfigurasi *Perforated Plate* di Temperatur (a) 45°C, (b) 55°C, dan (c) 65°C

Setelah didapatkan data temperatur dan *relative humidity* udara pengering pada tiap *plane* yang telah ditentukan dari hasil simulasi Fluent 19.2, maka dilakukan analisis pada *psychrometric chart* untuk mengetahui perubahan kondisi udara pengering pada setiap posisi *plane* tersebut. Plot *psychrometric chart* pada variasi konfigurasi *perforated plate* untuk ketiga variasi temperatur ditunjukkan pada gambar 4.44. Kemudian plot *psychrometric chart* temperatur 45°C ditunjukkan pada gambar 4.45 (a), temperatur 55°C ditunjukkan pada gambar 4.45 (b), dan temperatur 65°C ditunjukkan pada gambar 4.45 (c).

Seperti yang telah diketahui, proses pendinginan ataupun pemanasan dapat tergambar dengan perpindahan titik secara horizontal ke kiri atau ke kanan. Sedangkan, proses pelembaban atau pengeringan dapat tergambar dengan perpindahan titik secara vertikal ke atas atau bawah. Terjadinya perpindahan panas dari udara menuju batubara juga perpindahan massa H₂O dari batubara ke udara maka menyebabkan titik kondisi udara pengering akan menuju kiri atas dari titik kondisi *inlet*. Garis yang melintang tersebut merupakan proses pengeringan dimana udara kering masuk melalui *drying chamber*. Titik di sebelah kanan merupakan posisi *inlet*, lalu untuk titik paling kiri merupakan posisi *outlet* setelah simulasi. Dapat dilihat bahwa semakin menuju posisi *outlet* memiliki nilai *relative humidity* yang semakin menurun dan temperatur *outlet* semakin naik, sehingga mengakibatkan selisih dari *humidity ratio* semakin kecil. Posisi *inlet* mempunyai temperatur tinggi tetapi *relative humidity* dan *humidity ratio*-nya rendah, namun pada posisi *outlet* mempunyai temperatur yang lebih rendah tetapi *relative humidity* dan *humidity ratio*-nya tinggi. Hal ini dikarenakan proses pengeringan dimana terjadi pendinginan dan H₂O batubara terbawa oleh udara sehingga massa H₂O udara menjadi bertambah. Jika selisih *humidity ratio* semakin kecil maka semakin sedikit kandungan H₂O pada batubara yang ter-evaporasi. Hal ini yang membuat grafik *moisture content* semakin landai menjelang akhir proses.

Berikut adalah proses yang terjadi dalam *psychrometric chart* pada variasi konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* di atas.

- Proses 1-2 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah. Dapat dilihat pada temperatur 65°C memiliki penurunan temperatur dan kenaikan nilai *relative humidity* yang lebih besar dibandingkan proses berikutnya, sehingga nilai delta *humidity ratio* pun paling besar. Hal ini dikarenakan kadar air pada udara pengering masih sedikit sehingga mampu menyerap *moisture content* pada batubara lebih besar. Kemudian pada proses setelahnya nilai delta *humidity ratio* akan semakin mengecil, hal ini dikarenakan semakin menuju *outlet* maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang. Disamping itu, baik pada *staggered* maupun *aligned perforated plate* memiliki perbedaan nilai *humidity ratio* yang sangat kecil. Hal ini berarti kemampuan udara pengering dalam menyerap *moisture content* batubara pada *aligned* dan *staggered* yaitu sama. Sehingga didapatkan bahwa konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* tidak memberikan pengaruh terhadap proses pengeringan batubara.

- Proses 2-3 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah.

- Proses 3-4 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah.

- Proses 4-5 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara yang memiliki temperatur lebih rendah.

- Proses 5-6 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara. Namun, peningkatannya lebih kecil dibandingkan dengan proses sebelumnya karena semakin ke atas maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang. Namun, peningkatannya sangat kecil dibandingkan dengan proses sebelumnya karena semakin ke atas maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang.

- Proses 6-7 (*cooling* dan *humidifying*)

Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara. Namun, peningkatannya sangat kecil dibandingkan dengan proses sebelumnya karena semakin ke atas maka kadar air pada udara semakin banyak sehingga kemampuan udara untuk menyerap air dari batubara juga semakin berkurang.

Dari hasil karakteristik *psychrometric chart* pada variasi konfigurasi *perforated plate*, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi *perforated plate* baik *aligned* maupun *staggered* tidak memiliki perbedaan yang signifikan, dikarenakan perbedaan *humidity ratio* antara *aligned perforated plate* dan *staggered* sangat sedikit. Akan tetapi, konfigurasi *perforated plate aligned* memiliki delta *humidity ratio* yang sedikit lebih besar dibandingkan konfigurasi *perforated plate staggered*. Sehingga pada konfigurasi *perforated plate aligned* jumlah kandungan H₂O sedikit lebih banyak dibandingkan konfigurasi *perforated plate staggered*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan, maka dalam penelitian mengenai simulasi proses pengeringan batubara dengan variasi temperatur udara pengering dan konfigurasi *perforated plate* didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengeringan batubara paling baik didapatkan pada variasi temperatur udara pengering 65°C dengan konfigurasi *perforated plate aligned* yang menurunkan *moisture content* dari batubara sebesar 27,75%, sedangkan pada variasi temperatur 65°C dengan konfigurasi *perforated plate staggered* menurunkan *moisture content* dari batubara sebesar 27,97%. Diketahui bahwa konfigurasi *perforated plate aligned* dan *perforated plate staggered* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses pengeringan batubara, hal ini dikarenakan konfigurasi *perforated plate aligned* dan *staggered* memiliki luasan *open-area* yang sama. Tetapi tipe *perforated plate aligned* menunjukkan pengeringan yang sedikit lebih baik.
2. Semakin tinggi temperatur *inlet* maka jumlah *moisture content* yang diserap dari batubara semakin banyak dalam waktu yang sama, serta laju pengeringan batubara semakin meningkat.
3. Proses yang terjadi pada *psychrometric chart* adalah *cooling* dan *humidifying* yaitu terjadi penurunan temperatur dan peningkatan kandungan air pada sisi *inlet* ke *outlet*, diakibatkan udara pengering melewati batubara, dan membawa kandungan batubara ke sisi *outlet*.

5.2 Saran

Berikut adalah saran yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas penelitian kedepannya.

1. Untuk pemodelan secara numerik dapat dilakukan dengan metodologi yang memperlihatkan bahwa adanya perpindahan massa dari dalam batubara, bukan hanya di permukaan saja.
2. Perlu dilakukan simulasi secara 3D pemodelan geometri dengan bentuk yang sesuai baik bentuk *drying chamber* maupun batubara untuk mendekati kondisi sesungguhnya.
3. Penelitian disimulasikan dengan kondisi *unsteady* agar hasil yang didapat mendekati kondisi sesungguhnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Allardie D.J, E. D. (1978). *Analytical Methods for Coal and Coal Products*. New York: Academic Press.
- Badan Pusat Statistik. (2020). Diambil kembali dari <https://www.bps.go.id/indicator/7/869/1/kapasitas-terpasang-pembangkit-listrik-menurut-provinsi.html>
- Hardianto, T. (2012). Analisis Tentang Temperatur Pengeringan untuk endapatkan Hasil Terbaik dalam Proses Coal Upgrading Technology (CUT). *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI & Thermofluid IV, KE-099*, 533-537.
- Horio. (1975). *Reaction Engineering of Fluidized Bed, Chemical Engineering Series*. Baifuan Printing.
- Incropera, F. P. (2005). *Fundamental of Heat and Mass Transfer 6th Edition*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Levy, E. K. (2006). Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants. Dalam *Energy Research Center*. Bethlehem: Lehigh University.
- Mak, C. (2007). *Fine Coal Cleaning Using an Air Dense Medium*. University of Alberta Canada.
- Moran, M. S. (2014). *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Pikon, J. d. (2006). *Drying of Coal*. MC Gill University Canada.
- Pratama, A. S. (2020). Simulasi Pengaruh Perforated Plate dengan Variasi Suhu Udara Pengering Batubara Terhadap Kinerja Caol Dryeer dengan Tipe Fluidized Bed.
- PT. PLN (PERSERO). (2021, September Selasa). <https://web.pln.co.id/>. Diambil kembali dari <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>
- R. Kaur, I. S. (2015). Coal Analysis in Thermal Power Plant. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 14-15.
- Rhodes, M. (2008). Introduction to Particle Technology. 193-235.
- Sepfitrah. (2016). Analisis Proximate Hasil Tambang di Riau (Studi Kasus Logas , Selensen dan Pangkalan Lesung). *Jurnal Sainstek STT Pekanbaru*, 4(1), 18–26.
- Shyamkumar, J. A. (2016). Study on Sand Particles Drying in a Fluidized Bed Dryer using CFD.
- Sing, D. H. (2009). *Introduction to Food Engineering Edition*. London, UK: Elsevier.

Sofianita, N. (2021). Studi Numerik Pengaruh Variasi Temperatur dan Kecepatan Fluidisasi Coal Drying pada Fluidized Bed Coal Dryer Terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara dengan Tube Heater Tersusun Staggered.

Speight, J. (2005). *Handbook of Coal Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Wei Cheng, W. (2012). *Laboratory Investigation of Drying Process Illinois Coals*. Raleigh: North Carolina State University.

Zhu, Q. (2014). Coal Sampling and Analysis Standards. In *IEA Clean Coal Centre*. Diambil kembali dari [https://www.usea.org/sites/default/files/042014_Coal sampling and analysis standards_ccc235.pdf](https://www.usea.org/sites/default/files/042014_Coal%20sampling%20and%20analysis%20standards_ccc235.pdf)

LAMPIRAN 1

Tabel 1 Certificate of Sampling and Analysis Batubara

Attachment
To Certificate No. 00795/EOBOAK
Date: January 18, 2017

Page 1 of 1



Issuing Office:
Jl. Jend. A. Yani. No. 315 Surabaya 60234, Indonesia
Phone/Facs: +62 31 8470547/8470563
Email: labsurabaya@sucofindo.co.id

CERTIFICATE OF SAMPLING AND ANALYSIS

Parameters	Units	Results				Methods
		AR	ADB	DB	DAFB	
Proximate Analysis						
- Total Moisture	% wt	35.15	---	---	---	ASTM D 3302M-15
- Moisture In Analysis	% wt	---	14.10	---	---	ASTM D 3173-11
- Ash Content	% wt	2.88	3.81	4.44	---	ASTM D 3174-12
- Volatile Matter	% wt	31.58	41.83	48.70	50.96	ASTM D 3175-11
- Fixed Carbon	% wt	30.39	40.26	46.86	49.04	ASTM D 3172-13
Total Sulfur	% wt	0.19	0.25	0.29	0.30	ASTM D 4239-14e2
Gross Calorific Value	Kcal/Kg	4248	5627	6551	6855	ASTM D 5865-13

Ultimate Analysis:						
		AR	ADB	DB	DAFB	
- Total Moisture	% wt	35.15	---	---	---	ASTM D 3302M-15
- Moisture In Analysis	% wt	---	14.10	---	---	ASTM D 3173-11
- Ash Content	% wt	2.88	3.81	4.44	---	ASTM D 3174-12
- Carbon	% wt	45.71	60.55	70.49	73.76	ASTM D 5373-14
- Hydrogen (*)	% wt	3.55	4.70	5.47	5.73	ASTM D 5373-14
- Nitrogen	% wt	0.72	0.96	1.12	1.17	ASTM D 5373-14
- Sulfur	% wt	0.19	0.25	0.29	0.30	ASTM D 4239-14e2
- Oxygen (*)	% wt	11.80	15.63	18.20	19.04	ASTM D 3176-15
HGI	Point index	55				ASTM D 409M-12
Size Distribution						
+ 70 mm	% wt	1				ASTM D 4749-87 (2012)
- 70 mm	% wt	99				
- 50 mm	% wt	95				
- 32 mm	% wt	75				
- 2.38 mm	% wt	20				

Ash Analysis						
- SiO ₂	% wt	25.23				ASTM D 4326-13
- Al ₂ O ₃	% wt	16.13				
- Fe ₂ O ₃	% wt	16.21				
- CaO	% wt	18.00				
- MgO	% wt	13.83				
- TiO ₂	% wt	0.67				
- K ₂ O	% wt	0.97				
- Na ₂ O	% wt	0.34				
- P ₂ O ₅	% wt	0.26				
- SO ₃	% wt	7.65				
- MnO ₂	% wt	0.47				
Slagging Factor		0.34	(Low)			PO - BB - 42
Fouling Factor		0.40	(Medium)			PO - BB - 42

Ash Fusion Temperature						
		Reducing		Oxidizing		
- Initial Deformation	°C	1180		1230		ASTM D 1857M-04 (2010)
- Softening	°C	1190		1250		
- Hemisphere	°C	1200		1260		
- Flow	°C	1210		1270		

ARB : As Received Basis
ADB : Air Dried Basis

DB : Dry Basis
DAFB : Dry Ash Free Basis

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



0987875

SCI-2007P



LAMPIRAN 2

Tabel 2 Data Hasil Simulasi *Fluent*

Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>									
MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
	m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	2,4	318	300	0,35	64,82154	0,0454	1,040219	1111,745	0,0000288
2	2,4	318	312,477	0,33451	10,0706	0,0454	1,030845	1109,098	0,0000288
3	2,4	318	316,3176	0,32471	2,64524	0,0454	1,028602	1107,415	0,0000288
4	2,4	318	317,4891	0,321288	0,774591	0,0454	1,027973	1106,827	0,0000288
5	2,4	318	317,846	0,320201	0,233305	0,0454	1,027788	1106,64	0,0000288
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>									
MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
	m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	2,4	328	300	0,35	90,87141	0,0454	1,01709	1112,12	0,0000288
2	2,4	328	319,4046	0,326608	10,95	0,0454	1,003142	1108,157	0,0000288
3	2,4	328	325,3865	0,30887	3,045715	0,0454	1,000321	1104,851	0,0000288
4	2,4	328	327,2093	0,301803	0,881388	0,0454	0,999429	1103,924	0,0000288
5	2,4	328	327,7622	0,29954	0,139732	0,0454	0,999226	1103,537	0,0000288
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>									
MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
	m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	2,4	338	300	0,35	109,989	0,0454	0,994994	1112,493	0,0000288
2	2,4	338	326,3317	0,319743	9,831374	0,0454	0,976809	1107,419	0,0000288
3	2,4	338	334,4138	0,295367	3,298924	0,0454	0,973502	1102,587	0,0000288
4	2,4	338	336,9095	0,282908	0,954835	0,0454	0,972894	1100,469	0,0000288
5	2,4	338	337,6735	0,278838	0,283078	0,0454	0,972739	1099,777	0,0000288
Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>									
MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
	m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	2,4	318	300	0,35	61,83806	0,0454	1,042677	1105,507	0,0000288
2	2,4	318	313,0418	0,335207	9,139551	0,0454	1,033754	1103,267	0,0000288
3	2,4	318	316,6426	0,325906	2,449085	0,0454	1,031879	1101,842	0,0000288
4	2,4	318	317,6306	0,322663	0,6521	0,0454	1,031372	1101,446	0,0000288
5	2,4	318	317,9006	0,321739	0,233305	0,0454	1,031369	1101,131	0,0000288
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>									
MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
	m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	2,4	328	300	0,35	86,60415	0,0454	1,018586	1106,001	0,0000288
2	2,4	328	320,2689	0,327677	10,18659	0,0454	1,005305	1102,648	0,0000288
3	2,4	328	325,8842	0,310235	2,958192	0,0454	1,002773	1100,12	0,0000288
4	2,4	328	327,4249	0,303173	0,831534	0,0454	1,002172	1099,297	0,0000288
5	2,4	328	327,845	0,301011	0,129512	0,0454	1,002015	1099,062	0,0000288

Tabel 2 Data Hasil Simulasi *Fluent* (Continued)

Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB	
	m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s	
1	2,4	338	300	0,35	105,0182	0,0454	0,995644	1106,493	0,0000288	
2	2,4	338	327,4841	0,321065	9,080045	0,0454	0,978338	1102,187	0,0000288	
3	2,4	338	335,1225	0,297066	3,130806	0,0454	0,975165	1098,695	0,0000288	
4	2,4	338	337,219	0,28482	0,913083	0,0454	0,974753	1097,019	0,0000288	
5	2,4	338	337,7898	0,28087	0,253078	0,0454	0,974687	1096,491	0,0000288	
Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
MENIT	PLANE	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
		m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	1	2,4	318	300	0,35	75,09223	0,0454	1,040553	1109,768	2,88E-05
	2	2,4	318	300	0,35	69,10102	0,0454	1,03453	1124,221	2,88E-05
	3	2,4	318	300	0,35	65,60445	0,0454	1,030563	1133,79	2,88E-05
	4	2,4	318	300	0,35	63,18161	0,0454	1,027637	1141,03	2,88E-05
	5	2,4	318	300	0,35	61,3282	0,0454	1,025267	1146,997	2,88E-05
	6	2,4	318	300	0,35	59,81387	0,0454	1,023237	1152,167	2,88E-05
	7	2,4	318	300	0,35	59,63987	0,0454	1,016692	1167,129	2,88E-05
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
MENIT	MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
		m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	1	2,4	328	300	0,35	106,7748	0,0454	1,016811	1110,195	2,88E-05
	2	2,4	328	300	0,35	97,5236	0,0454	1,012817	1124,647	2,88E-05
	3	2,4	328	300	0,35	92,1152	0,0454	1,010191	1134,169	2,88E-05
	4	2,4	328	300	0,35	88,3575	0,0454	1,008301	1141,374	2,88E-05
	5	2,4	328	300	0,35	85,4738	0,0454	1,00679	1147,323	2,88E-05
	6	2,4	328	300	0,35	83,1137	0,0454	1,005506	1152,483	2,88E-05
	7	2,4	328	300	0,35	82,7397	0,0454	1,000737	1167,14	2,88E-05
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
MENIT	MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
		m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	1	2,4	338	300	0,35	131,2874	0,0454	0,99434	1110,748	2,88E-05
	2	2,4	338	300	0,35	118,9364	0,0454	0,992312	1125,073	2,88E-05
	3	2,4	338	300	0,35	111,69	0,0454	0,990913	1134,545	2,88E-05
	4	2,4	338	300	0,35	106,6436	0,0454	0,989975	1141,715	2,88E-05
	5	2,4	338	300	0,35	102,7618	0,0454	0,98926	1147,645	2,88E-05
	6	2,4	338	300	0,35	99,5821	0,0454	0,988668	1152,795	2,88E-05
	7	2,4	338	300	0,35	99,0081	0,0454	0,985611	1166,661	2,88E-05

Tabel 2 Data Hasil Simulasi *Fluent* (Continued)

Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
MENIT	PLANE	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
		m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	1	2,4	318	300	0,35	70,89621	0,0454	1,041596	1108,526	2,88E-05
	2	2,4	318	300	0,35	66,0073	0,0454	1,036627	1120,492	2,88E-05
	3	2,4	318	300	0,35	62,95729	0,0454	1,03319	1128,939	2,88E-05
	4	2,4	318	300	0,35	60,58189	0,0454	1,030463	1135,743	2,88E-05
	5	2,4	318	300	0,35	58,62254	0,0454	1,028156	1141,55	2,88E-05
	6	2,4	318	300	0,35	56,9646	0,0454	1,026119	1146,697	2,88E-05
	7	2,4	318	300	0,35	56,8366	0,0454	1,020384	1159,215	2,88E-05
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
MENIT	MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
		m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	1	2,4	328	300	0,35	100,6861	0,0454	1,018225	1108,976	2,88E-05
	2	2,4	328	300	0,35	93,12236	0,0454	1,01494	1120,913	2,88E-05
	3	2,4	328	300	0,35	88,38159	0,0454	1,012701	1129,336	2,88E-05
	4	2,4	328	300	0,35	84,65139	0,0454	1,010949	1136,105	2,88E-05
	5	2,4	328	300	0,35	81,61309	0,0454	1,00947	1141,895	2,88E-05
	6	2,4	328	300	0,35	79,05985	0,0454	1,008163	1147,032	2,88E-05
	7	2,4	328	300	0,35	78,70985	0,0454	1,003705	1159,529	2,88E-05
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
MENIT	MENIT	v inlet	T inlet	T coal awal	MC coal awal	h	k	ρ coal	Cp coal	DAB
		m/s	°K	°K	°K	W/m ² .K	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	m ² /s
1	1	2,4	338	300	0,35	123,9606	0,0454	0,995909	1109,414	2,88E-05
	2	2,4	338	300	0,35	113,7806	0,0454	0,99418	1121,317	2,88E-05
	3	2,4	338	300	0,35	107,3992	0,0454	0,993055	1129,717	2,88E-05
	4	2,4	338	300	0,35	102,381	0,0454	0,992213	1136,463	2,88E-05
	5	2,4	338	300	0,35	98,29865	0,0454	0,991513	1142,239	2,88E-05
	6	2,4	338	300	0,35	94,86787	0,0454	0,990894	1147,365	2,88E-05
	7	2,4	338	300	0,35	94,43187	0,0454	0,987629	1159,795	2,88E-05

Tabel 3 Data Hasil Perhitungan

Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>									
α	Le	hm	na"	na	time	na	Δ MC	MC coal	
m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
3,93E-05	1,36E+00	4,56E-02	3,56E-04	7,74E-05	60	0,004647	0,01549	0,35	0,3345103
3,97E-05	1,38E+00	7,11E-03	2,25E-04	4,90E-05	60	2,94E-03	9,80E-03	0,33	0,3247101
3,99E-05	1,38E+00	1,87E-03	7,86E-05	1,71E-05	60	1,03E-03	3,42E-03	0,32	0,3212877
3,99E-05	1,39E+00	5,48E-04	2,49E-05	5,43E-06	60	3,26E-04	1,09E-03	0,32	0,3202014
3,99E-05	1,39E+00	1,65E-04	7,70E-06	1,68E-06	60	1,01E-04	3,35E-04	0,32	0,3198662
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>									
α	Le	hm	na"	na	time	na	Δ MC	MC coal	
m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
4,01E-05	1,393645	0,064389	0,000537	1,17E-04	60	7,02E-03	0,023392	0,35	0,3266083
4,08E-05	1,42E+00	7,80E-03	4,07E-04	8,87E-05	60	5,32E-03	1,77E-02	0,33	0,3088697
4,11E-05	1,43E+00	2,17E-03	1,62E-04	3,53E-05	60	2,12E-03	7,07E-03	0,31	0,3018032
4,11E-05	1,43E+00	6,30E-04	5,20E-05	1,13E-05	60	6,79E-04	2,26E-03	0,30	0,2995396
4,12E-05	1,43E+00	9,99E-05	8,49E-06	1,85E-06	60	1,11E-04	3,70E-04	0,30	0,2991697
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>									
α	Le	hm	na"	na	time	na	Δ MC	MC coal	
m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
4,1E-05	1,424117	0,0785	0,000695	1,51E-04	60	9,08E-03	0,030257	0,35	0,3197432
4,20E-05	1,46E+00	7,07E-03	5,60E-04	1,22E-04	60	7,31E-03	2,44E-02	0,32	0,2953671
4,23E-05	1,47E+00	2,38E-03	2,86E-04	6,23E-05	60	3,74E-03	1,25E-02	0,30	0,2829078
4,24E-05	1,47E+00	6,89E-04	9,35E-05	2,03E-05	60	1,22E-03	4,07E-03	0,28	0,2788384
4,24E-05	1,47E+00	2,04E-04	2,87E-05	6,25E-06	60	3,75E-04	1,25E-03	0,28	0,2775875
Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>									
α	Le	hm	na"	na	time	na	Δ MC	MC coal	
m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
3,94E-05	1,37E+00	4,35E-02	3,40E-04	7,4E-05	60	0,004438	0,014793	0,35	0,3352072
3,98E-05	1,38E+00	6,46E-03	2,14E-04	4,65E-05	60	2,79E-03	9,30E-03	0,34	0,3259057
3,99E-05	1,39E+00	1,73E-03	7,45E-05	1,62E-05	60	9,73E-04	3,24E-03	0,33	0,3226629
4,00E-05	1,39E+00	4,61E-04	2,12E-05	4,62E-06	60	2,77E-04	9,24E-04	0,32	0,3217391
4,00E-05	1,39E+00	1,65E-04	7,73E-06	1,68E-06	60	1,01E-04	3,37E-04	0,32	0,3214026
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>									
α	Le	hm	na"	na	time	na	Δ MC	MC coal	
m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
4,03E-05	1,399298	0,061449	0,000513	1,12E-04	60	6,70E-03	0,022323	0,35	0,3276767
4,10E-05	1,42E+00	7,27E-03	4,01E-04	8,72E-05	60	5,23E-03	1,74E-02	0,33	0,3102354
4,12E-05	1,43E+00	2,11E-03	1,62E-04	3,53E-05	60	2,12E-03	7,06E-03	0,31	0,3031734
4,12E-05	1,43E+00	5,94E-04	4,96E-05	1,08E-05	60	6,49E-04	2,16E-03	0,30	0,3010114
4,12E-05	1,43E+00	9,26E-05	7,91E-06	1,72E-06	60	1,03E-04	3,45E-04	0,30	0,3006669

Tabel 3 Data Hasil Perhitungan (Continued)

Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal		
m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir	
4,12E-05	1,430905	0,075071	0,000664	1,45E-04	60	8,68E-03	0,028935	0,35	0,3210648	
4,21E-05	1,46E+00	6,54E-03	5,51E-04	1,20E-04	60	7,20E-03	2,40E-02	0,32	0,2970663	
4,24E-05	1,47E+00	2,26E-03	2,81E-04	6,12E-05	60	3,67E-03	1,22E-02	0,30	0,2848200	
4,25E-05	1,47E+00	6,59E-04	9,07E-05	1,98E-05	60	1,19E-03	3,95E-03	0,28	0,2808696	
4,25E-05	1,48E+00	1,83E-04	2,58E-05	5,62E-06	60	3,37E-04	1,12E-03	0,28	0,2797447	
Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	3,93151E-05	1,365108	0,052843	4,12E-04	1,28E-05	60	0,000769	0,01781	0,35	0,33219
2	3,90356E-05	1,355403	0,048511	0,000378	1,18E-05	60	0,000706	0,01635	0,35	0,33365
3	3,88551E-05	1,349137	0,045986	0,000359	1,12E-05	60	0,00067	0,015499	0,35	0,334501
4	3,87186E-05	1,344394	0,044235	0,000345	1,07E-05	60	0,000644	0,014909	0,35	0,335091
5	3,86062E-05	1,340492	0,042896	0,000335	1,04E-05	60	0,000625	0,014458	0,35	0,335542
6	3,85092E-05	1,337124	0,041802	0,000326	1,01E-05	60	0,000609	0,014089	0,35	0,335911
7	3,82602E-05	1,32848	0,04159	0,000324	1,01E-05	60	0,000606	0,014018	0,35	0,335982
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	4,02176E-05	1,396444	0,075709	6,32E-04	1,96E-05	60	0,001179	0,027286	0,35	0,322714
2	3,98574E-05	1,383936	0,068942	0,000575	1,79E-05	60	0,001073	0,024847	0,35	0,325153
3	3,96255E-05	1,375884	0,064992	0,000542	1,69E-05	60	0,001012	0,023423	0,35	0,326577
4	3,94491E-05	1,369762	0,062248	0,000519	1,62E-05	60	0,000969	0,022434	0,35	0,327566
5	3,93035E-05	1,364704	0,060143	0,000502	1,56E-05	60	0,000936	0,021675	0,35	0,328325
6	3,91775E-05	1,36033	0,058419	0,000487	1,52E-05	60	0,00091	0,021054	0,35	0,328946
7	3,88698E-05	1,349647	0,058004	0,000484	1,51E-05	60	0,000903	0,020905	0,35	0,329095
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	4,11061E-05	1,427293	0,09377	0,00083	2,58E-05	60	0,001549	0,035856	0,35	0,314144
2	4,06656E-05	1,411999	0,084644	0,000749	2,33E-05	60	0,001398	0,032366	0,35	0,317634
3	4,0383E-05	1,402188	0,079302	0,000702	2,18E-05	60	0,00131	0,030324	0,35	0,319676
4	4,01674E-05	1,394703	0,075584	0,000669	2,08E-05	60	0,001249	0,028902	0,35	0,321098
5	3,99888E-05	1,388499	0,072725	0,000644	2E-05	60	0,001201	0,027809	0,35	0,322191
6	3,98339E-05	1,383123	0,070384	0,000623	1,94E-05	60	0,001163	0,026913	0,35	0,323087
7	3,94826E-05	1,370923	0,069772	0,000618	1,92E-05	60	0,001153	0,026679	0,35	0,323321

Tabel 3 Data Hasil Perhitungan (*Continued*)

Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	3,93151E-05	1,365108	0,052843	4,12E-04	1,28E-05	60	0,000769	0,01781	0,35	0,33219
2	3,90356E-05	1,355403	0,048511	0,000378	1,18E-05	60	0,000706	0,01635	0,35	0,33365
3	3,88551E-05	1,349137	0,045986	0,000359	1,12E-05	60	0,00067	0,015499	0,35	0,334501
4	3,87186E-05	1,344394	0,044235	0,000345	1,07E-05	60	0,000644	0,014909	0,35	0,335091
5	3,86062E-05	1,340492	0,042896	0,000335	1,04E-05	60	0,000625	0,014458	0,35	0,335542
6	3,85092E-05	1,337124	0,041802	0,000326	1,01E-05	60	0,000609	0,014089	0,35	0,335911
7	3,82602E-05	1,32848	0,04159	0,000324	1,01E-05	60	0,000606	0,014018	0,35	0,335982
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	4,02176E-05	1,396444	0,075709	6,32E-04	1,96E-05	60	0,001179	0,027286	0,35	0,322714
2	3,98574E-05	1,383936	0,068942	0,000575	1,79E-05	60	0,001073	0,024847	0,35	0,325153
3	3,96255E-05	1,375884	0,064992	0,000542	1,69E-05	60	0,001012	0,023423	0,35	0,326577
4	3,94491E-05	1,369762	0,062248	0,000519	1,62E-05	60	0,000969	0,022434	0,35	0,327566
5	3,93035E-05	1,364704	0,060143	0,000502	1,56E-05	60	0,000936	0,021675	0,35	0,328325
6	3,91775E-05	1,36033	0,058419	0,000487	1,52E-05	60	0,00091	0,021054	0,35	0,328946
7	3,88698E-05	1,349647	0,058004	0,000484	1,51E-05	60	0,000903	0,020905	0,35	0,329095
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	4,11061E-05	1,427293	0,09377	0,00083	2,58E-05	60	0,001549	0,035856	0,35	0,314144
2	4,06656E-05	1,411999	0,084644	0,000749	2,33E-05	60	0,001398	0,032366	0,35	0,317634
3	4,0383E-05	1,402188	0,079302	0,000702	2,18E-05	60	0,00131	0,030324	0,35	0,319676
4	4,01674E-05	1,394703	0,075584	0,000669	2,08E-05	60	0,001249	0,028902	0,35	0,321098
5	3,99888E-05	1,388499	0,072725	0,000644	2E-05	60	0,001201	0,027809	0,35	0,322191
6	3,98339E-05	1,383123	0,070384	0,000623	1,94E-05	60	0,001163	0,026913	0,35	0,323087
7	3,94826E-05	1,370923	0,069772	0,000618	1,92E-05	60	0,001153	0,026679	0,35	0,323321
Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	3,93197E-05	1,365269	0,049892	3,89E-04	1,21E-05	60	0,000726	0,016816	0,35	0,333184
2	3,90863E-05	1,357163	0,04636	0,000362	1,13E-05	60	0,000675	0,015625	0,35	0,334375
3	3,89229E-05	1,351489	0,044156	0,000344	1,07E-05	60	0,000643	0,014882	0,35	0,335118
4	3,87921E-05	1,346948	0,042442	0,000331	1,03E-05	60	0,000618	0,014305	0,35	0,335695
5	3,86814E-05	1,343104	0,04103	0,00032	9,96E-06	60	0,000597	0,013829	0,35	0,336171
6	3,85842E-05	1,339729	0,039836	0,000311	9,67E-06	60	0,00058	0,013426	0,35	0,336574
7	3,83821E-05	1,33271	0,039677	0,00031	9,63E-06	60	0,000578	0,013373	0,35	0,336627

Tabel 3 Data Hasil Perhitungan (*Continued*)

Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	4,02059E-05	1,39604	0,071385	5,96E-04	1,85E-05	60	0,001111	0,025727	0,35	0,324273
2	3,99065E-05	1,385642	0,065858	0,000549	1,71E-05	60	0,001025	0,023735	0,35	0,326265
3	3,96965E-05	1,378349	0,062395	0,000521	1,62E-05	60	0,000971	0,022487	0,35	0,327513
4	3,95283E-05	1,37251	0,059677	0,000498	1,55E-05	60	0,000929	0,021508	0,35	0,328492
5	3,93855E-05	1,367551	0,057466	0,000479	1,49E-05	60	0,000895	0,020711	0,35	0,329289
6	3,92599E-05	1,363192	0,055609	0,000464	1,44E-05	60	0,000866	0,020042	0,35	0,329958
7	3,90093E-05	1,35449	0,055245	0,000461	1,43E-05	60	0,00086	0,01991	0,35	0,33009
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>										
PLANE	α	Le	hm	na"	na	time	na	ΔMC	MC coal	
	m ² /s		m/s	kg/m ² .s	kg/s	s	kg		awal	akhir
1	4,10906E-05	1,426758	0,088526	0,000784	2,44E-05	60	0,001462	0,03385	0,35	0,31615
2	4,07251E-05	1,414066	0,081014	0,000717	2,23E-05	60	0,001338	0,030978	0,35	0,319022
3	4,04681E-05	1,405142	0,076309	0,000675	2,1E-05	60	0,001261	0,029179	0,35	0,320821
4	4,0262E-05	1,397986	0,07262	0,000643	2E-05	60	0,0012	0,027768	0,35	0,322232
5	4,00867E-05	1,3919	0,069623	0,000616	1,92E-05	60	0,00115	0,026622	0,35	0,323378
6	3,99326E-05	1,386548	0,067107	0,000594	1,85E-05	60	0,001109	0,02566	0,35	0,32434
7	3,96352E-05	1,376222	0,066632	0,00059	1,83E-05	60	0,001101	0,025479	0,35	0,324521

Tabel 4 Data Nilai Distribusi Temperatur

Distribusi Temperatur pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	45	45	45	45	45
2	43,2758	43,2752	43,2755	43,2752	43,2755
3	42,5362	42,5364	42,5368	42,5364	42,5343
4	41,3335	41,3344	41,3952	41,3583	41,3554
5	40,2865	40,2630	40,2639	40,2506	40,2874
6	40,0671	40,0764	40,0783	40,0765	40,0688

Distribusi Temperatur pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	55	55	55	55	55
2	52,3021	52,3018	52,3017	52,3016	52,3014
3	51,1497	51,1526	51,1531	51,1526	51,1494
4	49,2791	49,2674	49,2687	49,2682	49,2636
5	47,6363	47,6296	47,6312	47,6303	47,6354
6	47,2915	47,2889	47,2928	47,2890	47,2868

Distribusi Temperatur pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	45	45	45	45	45
2	43,2345	43,2352	43,2355	43,2361	43,2353
3	42,5342	42,5364	42,5368	42,5394	42,5371
4	41,3995	41,3027	41,3036	41,3661	41,3630
5	40,2758	40,2799	40,2805	40,2798	40,2756
6	40,0897	40,0973	40,0989	40,0972	40,0895

Distribusi Temperatur pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	55	55	55	55	55
2	52,3993	52,3004	52,3008	52,3018	52,3005
3	51,1493	51,1526	51,1531	51,1574	51,1539
4	49,2753	49,2804	49,2816	49,2805	49,2755
5	47,6095	47,6159	47,6170	47,6158	47,6092
6	47,2487	47,2613	47,2647	47,2612	47,2484

Distribusi Temperatur pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	42,56439	42,56491	42,56517	42,5649	42,56438
2	42,5649	42,5655	42,5658	42,5655	42,5649
3	42,5652	42,5466	42,5661	42,5658	42,5652
4	42,5649	42,5655	42,5658	42,5655	42,5649
5	42,5644	42,5649	42,5652	42,5649	42,5644

Distribusi Temperatur pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	51,14079	51,14158	51,14202	51,14156	51,14077
2	51,1416	51,1425	51,1430	51,1425	51,1416
3	51,1420	51,1430	51,1435	51,1430	51,1420
4	51,1416	51,1425	51,1430	51,1425	51,1416
5	51,1408	51,1416	51,1420	51,1416	51,1408

Distribusi Temperatur pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	65	65	65	65	65
2	61,3776	61,3514	61,3518	61,2514	61,3498
3	59,7515	59,7435	59,6441	59,7435	59,7439
4	57,2132	57,4019	57,2935	57,3541	57,4339
5	54,9648	54,9657	54,9683	54,0902	54,0836
6	54,4947	54,9295	54,9343	54,9297	54,9122

Distribusi Temperatur pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	65	65	65	65	65
2	61,3498	61,3514	61,3518	61,3532	61,3515
3	59,7391	59,7435	59,7441	59,7501	59,7454
4	57,2124	57,2197	57,2210	57,2575	57,2502
5	54,9928	54,9001	54,9027	54,9013	54,9924
6	54,4554	54,4729	54,4765	54,4728	54,4550

Distribusi Temperatur pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	45	45	45	45	45
2	43,4435	43,4329	43,4209	43,4082	43,3831
3	42,8560	42,7338	42,7167	42,6940	42,6658
4	42,0080	41,9862	41,9917	41,9318	41,8955
5	40,8588	40,9291	40,9264	40,9575	40,9849
6	40,4595	40,5009	40,5351	40,5648	40,5937

Distribusi Temperatur pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	45	45	45	45	45
2	43,4835	43,4329	43,4209	43,4082	43,3831
3	42,9560	42,9338	42,9167	42,9940	42,9658
4	41,7080	41,7862	41,7917	41,7318	41,7955
5	40,6588	40,6291	40,6264	40,6575	40,6849
6	40,4595	40,5009	40,5351	40,4648	40,5937

Distribusi Temperatur pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	59,73926	59,73003	59,73091	59,73216	59,73922
2	59,7303	59,7315	59,7322	59,7315	59,7302
3	59,7309	59,7322	59,7329	59,7322	59,7309
4	59,7302	59,7315	59,7322	59,7315	59,7303
5	59,7392	59,7302	59,7309	59,7303	59,7393

Distribusi Temperatur pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	42,86371	42,8668	42,86952	42,87149	42,8741
2	42,8662	42,8696	42,8726	42,8747	42,8774
3	42,8676	42,8712	42,8743	42,8766	42,8794
4	42,8679	42,8713	42,8746	42,8771	42,8801
5	42,8685	42,8709	42,8740	42,8767	42,8800

Tabel 4 Data Nilai Distribusi Temperatur (*Continued*)

Distribusi Temperatur pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	55	55	55	55	55
2	52,5566	52,5402	52,5213	52,5015	52,4628
3	51,6378	51,4463	51,4196	51,3840	51,3409
4	50,3079	50,2737	50,2819	50,1883	50,1323
5	48,5053	48,6159	48,6107	48,6592	48,7024
6	47,8789	47,9427	47,9960	48,0422	48,0879
Distribusi Temperatur pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	55	55	55	55	55
2	52,5650	52,5402	52,5213	52,5015	52,4628
3	51,6378	51,4463	51,4196	51,3840	51,3409
4	49,6597	49,2737	49,2819	49,1883	49,1323
5	47,9053	47,8159	47,9107	47,8592	47,9024
6	47,5480	47,5427	47,5960	47,5422	47,4879
Distribusi Temperatur pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	51,68544	51,69027	51,69459	51,69767	51,60181
2	51,6892	51,6946	51,6994	51,6028	51,6070
3	51,6914	51,6968	51,6018	51,6056	51,6101
4	51,6916	51,6970	51,6022	51,6062	51,6109
5	51,6926	51,6965	51,6013	51,6056	51,6107

Distribusi Temperatur pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	65	65	65	65	65
2	61,6554	61,6330	61,6072	61,5803	61,5283
3	60,4017	60,1399	60,1036	60,0551	59,9972
4	58,5822	58,5355	58,5463	58,4187	58,3435
5	56,1155	56,2678	56,2596	56,3257	56,3847
6	55,2586	55,3451	55,4174	55,4801	55,5430
Distribusi Temperatur pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	65	65	65	65	65
2	61,6776	61,6330	61,6072	61,5803	61,5283
3	60,1971	60,1399	60,1036	60,0551	59,9972
4	57,7025	57,5355	57,5463	57,4187	57,3435
5	55,3212	55,2678	55,2596	55,3257	55,3847
6	54,6298	54,5451	54,6174	54,6801	54,6430
Distribusi Temperatur pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	60,49682	60,49682	60,40279	60,40697	60,41273
2	60,4028	60,4028	60,4093	60,4139	60,4198
3	60,4054	60,4054	60,4124	60,4174	60,4237
4	60,4057	60,4057	60,4128	60,4183	60,4248
5	60,4051	60,4051	60,4117	60,4175	60,4246

Tabel 5 Data Distribusi Fraksi Massa H₂O

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168
3	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171
4	0,0176	0,0176	0,0176	0,0176	0,0176
5	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179
6	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172
3	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177
4	0,0183	0,0183	0,0183	0,0183	0,0183
5	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
6	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166
3	0,0171	0,0171	0,0172	0,0171	0,0171
4	0,0176	0,0176	0,0176	0,0176	0,0176
5	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179
6	0,0180	0,0179	0,0180	0,0180	0,0180

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171
3	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177
4	0,0183	0,0183	0,0183	0,0184	0,0183
5	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
6	0,0190	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01715	0,017151	0,017151	0,017151	0,01715
2	0,0172	0,0172	0,0171	0,0172	0,0171
3	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172
4	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172
5	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,017696	0,017696	0,017696	0,017696	0,017696
2	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177
3	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177
4	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177
5	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175
3	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181
4	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191
5	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199
6	0,0202	0,0202	0,0202	0,0202	0,0202

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0167	0,0166	0,0167	0,0167	0,0167
3	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169
4	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174
5	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177
6	0,0178	0,0178	0,0178	0,0178	0,0178

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175
3	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181
4	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191
5	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199
6	0,0202	0,0201	0,0202	0,0202	0,0202

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166
3	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169
4	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174
5	0,0178	0,0178	0,0178	0,0178	0,0178
6	0,0178	0,0178	0,0178	0,0178	0,0179

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Aligned - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,018115	0,018115	0,018115	0,018114	0,018115
2	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181
3	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181
4	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181
5	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(45°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719
2	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719
3	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719
4	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719
5	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719	0,01719

Tabel 5 Data Nilai Distribusi Fraksi Massa H₂O (*Continued*)

Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XY</i>						Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XY</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5	Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0170	0,0170	0,0170	0,0170	0,0170	2	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174
3	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174	3	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180
4	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	4	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189
5	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	5	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199
6	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	6	0,0202	0,0202	0,0202	0,0202	0,0202
Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane YZ</i>						Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane YZ</i>					
Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Posisi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	1	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614	0,01614
2	0,0170	0,0170	0,0170	0,0170	0,0170	2	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173
3	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174	0,0174	3	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180
4	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	4	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
5	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	5	0,0198	0,0198	0,0198	0,0198	0,0198
6	0,0190	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	6	0,0202	0,0202	0,0203	0,0203	0,0202
Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(55°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XZ</i>						Distribusi Fraksi Massa H ₂ O pada T(65°C) Konfigurasi <i>Perforated Plate Staggered - Plane XZ</i>					
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5	Posisi	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	1	0,01819	0,01819	0,01819	0,01819	0,01819
2	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	2	0,01820	0,01820	0,01812	0,01820	0,01820
3	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	3	0,01819	0,01819	0,01812	0,01819	0,01819
4	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	4	0,01819	0,01819	0,01819	0,01819	0,01819
5	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	0,01766	5	0,01819	0,01819	0,01819	0,01819	0,01819

Tabel 6 Data Nilai Laju Perpindahan Panas Batubara pada Sumbu Y

Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>						
PLANE	T inlet	T coal awal	h	A	ΔT	Q
	°K	°K	W/m ² .K	m ²	°K	J/s
1	318	300	75,09223	0,031104	18	42,04203
2	318	300	69,10102	0,031104	18	38,68773
3	318	300	65,60445	0,031104	18	36,7301
4	318	300	63,18161	0,031104	18	35,37361
5	318	300	61,3282	0,031104	18	34,33594
6	318	300	59,81387	0,031104	18	33,48811
7	318	300	59,63987	0,031104	18	33,39069
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>						
PLANE	T inlet	T coal awal	h	A	ΔT	Q
	°K	°K	W/m ² .K	m ²	°K	J/s
1	328	300	106,7748	0,031104	28	92,99145
2	328	300	97,5236	0,031104	28	84,93447
3	328	300	92,1152	0,031104	28	80,22423
4	328	300	88,3575	0,031104	28	76,95161
5	328	300	85,4738	0,031104	28	74,44016
6	328	300	83,1137	0,031104	28	72,38472
7	328	300	82,7397	0,031104	28	72,059
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Aligned Perforated Plate</i>						
PLANE	T inlet	T coal awal	h	A	ΔT	Q
	°K	°K	W/m ² .K	m ²	°K	J/s
1	338	300	131,2874	0,031104	38	155,1754
2	338	300	118,9364	0,031104	38	140,5771
3	338	300	111,69	0,031104	38	132,0123
4	338	300	106,6436	0,031104	38	126,0476
5	338	300	102,7618	0,031104	38	121,4595
6	338	300	99,5821	0,031104	38	117,7013
7	338	300	99,0081	0,031104	38	117,0228
Temperatur 45°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>						
PLANE	T inlet	T coal awal	h	A	ΔT	Q
	°K	°K	W/m ² .K	m ²	°K	J/s
1	318	300	70,89621	0,031104	18	39,6928
2	318	300	66,0073	0,031104	18	36,95564
3	318	300	62,95729	0,031104	18	35,24802
4	318	300	60,58189	0,031104	18	33,9181
5	318	300	58,62254	0,031104	18	32,82112
6	318	300	56,9646	0,031104	18	31,89289
7	318	300	56,8366	0,031104	18	31,82122
Temperatur 55°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>						
PLANE	T inlet	T coal awal	h	A	ΔT	Q
	°K	°K	W/m ² .K	m ²	°K	J/s
1	328	300	100,6861	0,031104	28	87,68871
2	328	300	93,12236	0,031104	28	81,10138
3	328	300	88,38159	0,031104	28	76,97258
4	328	300	84,65139	0,031104	28	73,72391
5	328	300	81,61309	0,031104	28	71,07782
6	328	300	79,05985	0,031104	28	68,85417
7	328	300	78,70985	0,031104	28	68,54935
Temperatur 65°C Konfigurasi <i>Staggered Perforated Plate</i>						
PLANE	T inlet	T coal awal	h	A	ΔT	Q
	°K	°K	W/m ² .K	m ²	°K	J/s
1	338	300	123,9606	0,031104	38	146,5154
2	338	300	113,7806	0,031104	38	134,4833
3	338	300	107,3992	0,031104	38	126,9407
4	338	300	102,381	0,031104	38	121,0095
5	338	300	98,29865	0,031104	38	116,1843
6	338	300	94,86787	0,031104	38	112,1293
7	338	300	94,43187	0,031104	38	111,6139

Tabel 7 Data *Psychrometric Chart*

<i>Konfigurasi Perforated Plate Aligned</i>						
Posisi	45°C		55°C		65°C	
	T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)
1	45	27,14	55	16,55	65	10,43
2	43,442	30,56	52,579	19,663	61,718	13,03
3	42,485	32,79	51,083	21,865	59,680	14,94
4	41,744	34,66	49,926	23,731	58,102	16,61
5	41,120	36,3	48,949	25,48	56,768	18,17
6	40,568	37,85	48,083	27,032	55,583	19,66
7	40,050	39,32	47,267	28,63	54,464	21,19
<i>Konfigurasi Perforated Plate Staggered</i>						
Posisi	45°C		55°C		65°C	
	T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)
1	45	27,14	55	16,55	65	10,43
2	43,427	30,55	52,553	19,7	61,680	13,06
3	42,596	32,51	51,252	21,605	59,902	14,72
4	41,911	34,22	50,178	23,312	58,434	16,25
5	41,316	35,78	49,245	24,901	57,159	17,70
6	40,781	37,23	48,406	26,425	56,011	19,11
7	40,251	38,58	47,569	28,03	54,858	20,64

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BIODATA PENULIS



Herliyana Mei Rini atau biasa dipanggil yana sebagai penulis tugas akhir ini lahir di Tuban pada tanggal 2 Mei 1999. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Riwayat Pendidikan penulis yaitu, penulis sempat belajar di SDN Kebonsari II Tuban, SMPN 1 Tuban, SMAN 1 Tuban, dan penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi sarjana di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS pada tahun 2018 dengan NRP 0211184000028.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi. Dalam kegiatan akademik, penulis mengambil bidang studi Konvesi Energi, dan tercatat sebagai anggota

Laboratorium Rekayasa Termal dan Sistem Energi sejak tahun 2020. Kemudian pada tahun 2021, penulis juga tercatat

sebagai asisten praktikum Mekanika Fluida Dasar II dan asisten praktikum Perpindahan Panas. Dalam kegiatan berorganisasi, penulis tercatat aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin ITS pada tahun 2019 sebagai Staf Departemen Kewirausahaan dan pada tahun 2020 sebagai Sekretaris Departemen Departemen Kewirausahaan. Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan di luar kampus pada tahun 2018 dan 2019.

Apabila terdapat saran dan masukan penulis terkait Tugas Akhir ini dapat menghubungi melalui email: herliyanameirini@gmail.com