

**TUGAS AKHIR - TM184835**

**ANALISA NUMERIK PENGARUH VARIASI KECEPATAN  
FLUIDISASI DAN SUSUNAN *PERFORATED PLATE*  
TERHADAP KARAKTERISTIK *FLUIDIZED BED COAL  
DRYER* SECARA 3D DENGAN *SOFTWARE ANSYS FLUENT  
19.2***

**ANNISA FIRDAUS**

**NRP 02111840000005**

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**

**ANALISA NUMERIK PENGARUH VARIASI KECEPATAN  
FLUIDISASI DAN SUSUNAN *PERFORATED PLATE*  
TERHADAP KARAKTERISTIK *FLUIDIZED BED COAL*  
*DRYER* SECARA 3D DENGAN SOFTWARE ANSYS FLUENT  
19.2**

**ANNISA FIRDAUS**

**NRP 02111840000005**

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



**FINAL PROJECT - TM184835**

**NUMERICAL ANALYSIS THE INFLUENCE OF VARIATIONS  
FLUIDIZATION VELOCITY AND PERFORATED PLATE  
COMPOSITION ON THE CHARACTERISTIC FLUIDIZED  
BED COAL DRYER OF COAL DRYING IN 3D USING  
SOFTWARE ANSYS FLUENT 19.2**

**ANNISA FIRDAUS**

**NRP 02111840000005**

Advisor

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

**NIP 196505051990031005**

**Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering**

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA NUMERIK PENGARUH VARIASI KECEPATAN FLUIDISASI DAN SUSUNAN *PERFORATED PLATE* TERHADAP KARAKTERISTIK *FLUIDIZED BED* *COAL DRYER* SECARA 3D DENGAN *SOFTWARE 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: **ANNISA FIRDAUS**

NRP. 02111840000005

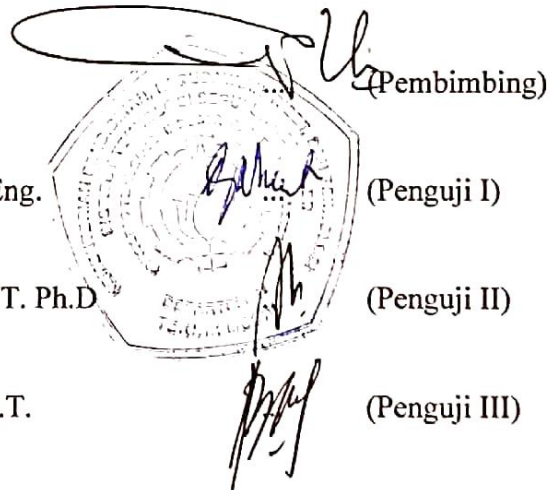
Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

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

2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichسانی, M.Eng.

3. Ary Bachtiar Krishna Putra, ST. MT. Ph.D

4. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.



(Pembimbing)

(Penguji I)

(Penguji II)

(Penguji III)

**SURABAYA**

**Juli, 2022**

# APPROVAL SHEET

## NUMERICAL ANALYSIS THE INFLUENCE OF VARIATIONS FLUIDIZATION VELOCITY AND PERFORATED PLATE COMPOSITION ON THE CHARACTERISTIC FLUIDIZED BED COAL DRYER OF COAL DRYING IN 3D USING SOFTWARE 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: **ANNISA FIRDAUS**

NRP. 0211184000005

Approved by Final Project Proposal Examiner Team:

1. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.  (Advisor)
2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng.  (Examiner I)
3. Ary Bachtiar Krishna Putra, ST. MT, Ph.D  (Examiner II)
4. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.  (Examiner III)

**SURABAYA**

**July, 2022**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Annisa Firdaus / 0211184000005

Departemen : Teknik Mesin

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

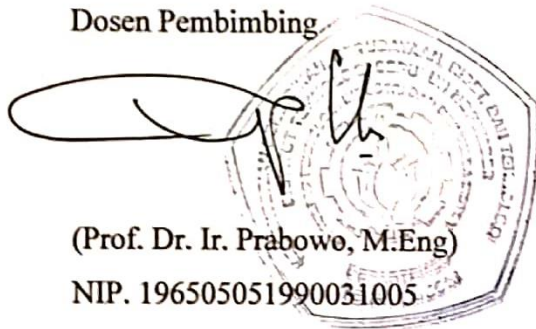
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisa Numerik Pengaruh Variasi Kecepatan Fluidisasi dan Susunan *Perforated Plate* terhadap Karakteristik *Fluidized Bed Coal Dryer* secara 3D dengan *Software Ansys Fluent 19.2*” adalah hasil saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis mengikuti 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,



(Annisa Firdaus)

NRP. 0211184000005

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Annisa Firdaus / 02111840000005

Department : Teknik Mesin

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

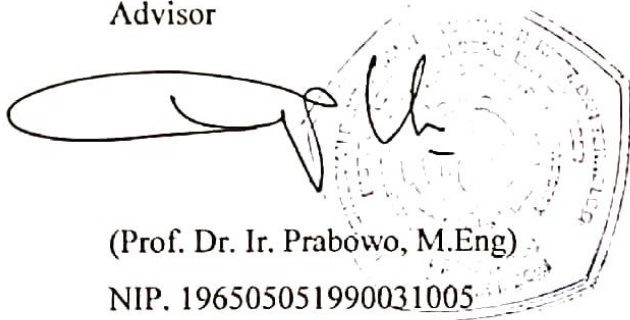
hereby declare taht the Final Project with the title of “Numerical Analysis The Influence of Variations Fluidization Velocity and Perforated Plate Composition on The Characteristic Fluidized Bed Coal Dryer of Coal Drying in 3D Using Software Ansys Fluent 19.2” is the result of my own work, is original, and is writtent by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 29 July 2022


Aknowledge

Advisor



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

Student



(Annisa Firdaus)  
NRP. 02111840000005

# ANALISA NUMERIK PENGARUH VARIASI KECEPATAN FLUIDISASI DAN SUSUNAN *PERFORATED PLATE* TERHADAP KARAKTERISTIK *FLUIDIZED BED COAL DRYER* SECARA 3D DENGAN ANSYS FLUENT 19.2

Nama Mahasiswa / NRP : Annisa Firdaus/0211184000005

Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS

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

## Abstrak

Batubara masih menjadi penyedia energi di Indonesia, namun batubara yang tersedia saat ini diantaranya 90,74% berkalori rendah sehingga termasuk *low rank coal* contohnya lignite dan bituminous. Hal ini kontradiksi dengan desain boiler pada PLTU dimana membutuhkan batubara kalori tinggi sekitar 2-15% karena memiliki *high heating value*. Jika tidak, *pulverizer* akan bekerja semua tanpa ada yang *standby* mengakibatkan apabila rusak atau membutuhkan *maintenance* akan menghambat kerja PLTU sehingga mengalami kerugian yang besar. Selain itu juga membutuhkan batubara *low rank* yang lebih banyak dibandingkan batubara *high* atau *medium rank*, memunculkan dampak kerusakan lingkungan. Maka ada suatu teknologi yakni *fluidized bed coal dryer*, yang dapat menurunkan kandungan air dari batubara sehingga menaikkan nilai kalornya. Adapun batasan permasalahan yaitu simulasi 3D ini dibuat kotak seluruh geometrinya untuk membantu penelitian.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari variasi kecepatan *inlet* senilai 1.6 m/s, 2 m/s, dan 2.4 m/s, serta susunan lubang pada *perforated plate aligned* dan *staggered* terhadap karakteristik pengeringan *fluidized bed coal dryer*. Digunakan metode numerik untuk melakukan penelitian ini, berbasis CFD dengan *software* ANSYS Fluent 19.2, yang dibantu juga dalam pengerjaan geometri maupun *meshing* oleh Gambit 2.4.6. Dilakukan simulasi ini, untuk mendapatkan hasil kualitatif berupa kontur serta data kuantitatif berupa *properties* setelah *running*, sehingga menghasilkan *psychrometric chart* untuk mengetahui mana karakteristik *fluidized bed coal dryer* yang terbaik.

Hasil penelitian yang diperoleh dari penelitian adalah penurunan *moisture content*, awalnya memiliki nilai fraksi massa yang sama yaitu 0,35. *Output moisture content* akhir pada menit kelima pada *perforated plate aligned* dengan beberapa variasi, untuk 1,6 m/s mencapai 0,30882, lalu 2 m/s menjadi 0,30811, serta 2,4 m/s memiliki perubahan fraksi massa kandungan air 0,30746. Hasil yang sama juga ditunjukkan pada *perforated plate* yang tersusun secara *staggered* dengan kecepatan 1,6 m/s menjadi 0,30947, selanjutnya dengan kecepatan *inlet* udara pengering 2 m/s yaitu 0,30866, dan 2,4 m/s menunjukkan perubahan *moisture content* 0,30754. Berdasarkan analisis dari data yang telah dilakukan, Semakin tinggi kecepatan udara *inlet* maka jumlah *moisture content* yang diserap dari batubara semakin banyak dalam waktu yang sama serta laju pengeringan batubara semakin meningkat. Dan *perforated plate* tidak memengaruhi yang proses pengeringan batubara dengan waktu yang sama. Proses yang terjadi pada *psychrometric chart* adalah *cooling* dan *humidifying* yaitu penurunan temperatur dan peningkatan kandungan air pada sisi *inlet* ke *outlet*, diakibatkan udara pengering melewati batubara.

**Kata kunci:** Batubara, *Fluidized Bed Coal Dryer*, Kecepatan, *Moisture Content*, *Psychrometric Chart*



**NUMERICAL ANALYSIS THE INFLUENCE OF VARIATIONS FLUIDIZATION  
VELOCITY AND PERFORATED PLATE COMPOSITION ON THE  
CHARACTERISTIC FLUIDIZED BED COAL DRYER OF COAL DRYING IN 3D  
USING SOFTWARE ANSYS FLUENT 19.2**

**Student Name / NRP** : Annisa Firdaus/02111840000005  
**Department** : Mechanical Engineering FTIRS - ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

**Abstract**

*Coal still is the producer energy in Indonesia, but coal that is available of them 90,74% have low calorie for example lignite and bituminous. This contradiction with the design a boiler at coal-fired power station where need high rank calories coal at 2-15% because having the high heating value. If it is not, pulverizer will all worked, and there was not standby pulverizer. When pulverizer broken or need maintenance work would slow down coal-fired power station so that encountered much loss. There is also need the coal low rank more than coal with the high or medium rank, gave rise to damage the environment. So, there is technology that namely fluidized bed coal dryer, that can be lowered moisture content from coal so increasing calorie value. The limitation of the problem is that this 3D simulation is made to box all the geometry to facilitate research.*

*This research aims to understand the influence of the variation of speed of an inlet of worth 1.6 m/s, 2 m/s, and 2,4 m/s, and the arrangement of the hole on perforated plate aligned and staggered against characteristic of drying fluidized bed coal dryer. Used method of numerical to do this research, based CFD with software ANSYS Fluent 19.2, and use Gambit 2.4.6 to do geometry and meshing. After simulation, it got contours of qualitative and quantitative data of properties after running, thus producing psychrometric chart to figure out which characteristic fluidized bed coal dryer is best.*

*The results of the study obtained from the study were a decrease in moisture content, initially having the same mass fraction value of 0.35. the final moisture content output in the fifth minute on the perforated plate aligned with several variations, for 1.6 m/s it reaches 0.30882, then 2 m/s to 0.30811, and 2.4 m/s has a change in the mass fraction of water content of 0.30746. The same result was also shown on the perforated plate which was arranged staggered at a speed of 1.6 m/s to 0.30947, then with a dryer air inlet speed of 2 m/s which was 0.30886, and 2.4 m/s showed a change in moisture content of 0.30754. Based on the analysis from the data that has been carried out, the higher the speed of the inlet air, the amount of moisture content absorbed from coal is increasing in the same time and the rate of coal drying is increasing. And the perforated plate does not affect that coal drying process with the same time. The process that occurs in the psychrometric chart is cooling and humidifying, namely a decrease in temperature and an increase in water content on the inlet side to the outlet, caused by drying air passing through coal.*

**Keywords:** *Coal, Fluidized Bed Coal Dryer, Moisture Content, Psychrometric Chart, Velocity*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, Tuhan Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, karena atas segala nikmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Shalawat dan salam penulis ucapkan kepada Nabi Muhammad SAW yang membawa cahaya keimanan dan agama Islam sebagai pedoman kehidupan untuk selalu bertaqwa dan beriman kepada Allah SWT.

Dalam pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada halaman ini, penulis ingin memberi hormat dan ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Muhammad Yunus, Ibu Maratus Saniyah dan Saudari Nailus Saadah dan Yenny Amalia tercinta yang selalu mendukung, memberikan kasih sayang dan tak henti-hentinya mendoakan penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan ide, pembelajaran dan pengetahuan yang tidak ternilai harganya bagi penulis untuk memberikan hasil yang bermanfaat.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani M.Eng, Bapak Ary Bachtiar Krishna Putra S.T., M.T., Ph.D., serta Bapak Dr. Bambang Sudarmata S.T., M.T. selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberi masukan maupun saran kepada penulis.
4. Segenap dosen Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran serta pengalaman dalam mendidik penulis dalam bidang keteknikan maupun ilmu tentang kehidupan selama penulis menempuh pendidikan sarjana di Teknik Mesin ITS.
5. Seluruh teman satu bimbingan (Yana, Febi, Nadia, Sutan, dan Kevnov) yang selalu bersama selama mengerjakan tugas akhir.
6. Seluruh keluarga M61 yang telah menemani penulis dari pengkaderan hingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut.

Penulis berharap agar tugas akhir ini bermanfaat untuk pembaca dan perkembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Surabaya, 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN SAMPUL .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iv
ABSTRAK .....	viii
KATA PENGANTAR .....	x
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR SIMBOL .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu .....	4
2.1.1 Edward K. Levy, dkk (2006) .....	4
2.1.2 Andi Kurniawan (2012) .....	6
2.1.3 Jibin Antony dan M.B. Shyamkumar (2016) .....	8
2.1.4 Al Velian Suci Hadi Widarwis (2018) .....	10
2.1.5 Elfita Yohana, dkk (2020) .....	11
2.1.6 Nuha Sofianita (2021) .....	13
2.2 Pengeringan Batubara .....	15
2.3 <i>Perforated Plate</i> .....	17
2.4 Prinsip Perpindahan Massa .....	17
2.5 Analogi Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa .....	18
2.6 Prinsip Psikrometri .....	19
2.7 Persamaan pada <i>Fluidized Bed</i> .....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	22
3.1 Model Pengeringan pada <i>Fluidized Bed Coal Dryer</i> .....	22
3.2 Tahapan Penelitian .....	23
3.2.1 Tahapan Pre-Processing .....	23
3.2.1.1 Domain Pemodelan pada <i>Chamber</i> Pengering Batubara .....	23
3.2.1.2 Meshing pada Gambit 2.4.6 .....	24
3.2.1.3 Define Zones pada Gambit 2.4.6 .....	25
3.2.2 Tahapan Processing .....	25
3.2.2.1 Solver .....	25
3.2.2.2 Models .....	26
3.2.2.3 Boundary Condition .....	26
3.2.2.4 Solution Methods .....	28
3.2.3 Tahapan Post-Processing .....	29
3.3 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	29
3.4 <i>Flowchart</i> Perhitungan .....	31
3.5 Rancangan Kegiatan Penelitian .....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	34
4.1 Data Penelitian .....	34

4.2 Contoh Perhitungan.....	34
4.2.1 Perhitungan Densitas H <sub>2</sub> O pada Permukaan Batubara.....	34
4.2.2 Perhitungan Densitas H <sub>2</sub> O pada Udara <i>Inlet</i> .....	35
4.2.3 Perhitungan setelah <i>Running Fluent</i> .....	35
4.2.4 Perhitungan Validasi .....	36
4.2.5 <i>Boundary Condition</i> untuk <i>Running</i> Berikutnya .....	38
4.3 Analisa Kontur .....	38
4.3.1 Analisa Kontur Temperatur pada Variasi Kecepatan pada <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> .....	39
4.3.2 Analisa Kontur Temperatur pada Variasi Kecepatan pada <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> .....	40
4.3.3 Analisa Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> Variasi Kecepatan.....	42
4.3.4 Analisa Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> Variasi Kecepatan .....	44
4.3.6 Analisa Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O dan Temperatur pada Variasi Susunan Lubang pada <i>Perforated Plate Staggered</i> dan <i>Aligned</i> .....	46
4.4 Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H <sub>2</sub> O .....	50
4.4.1 Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada Variasi Kecepatan .....	51
4.4.2 Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada Variasi Kecepatan .....	54
4.5 Analisa Perubahan <i>Moisture Content Average</i> terhadap Waktu .....	59
4.5.1 Analisa Perubahan <i>Moisture Content</i> terhadap Waktu pada Variasi Kecepatan .....	59
4.5.2 Analisa Perubahan <i>Moisture Content</i> terhadap Waktu pada Variasi Susunan Lubang <i>Perforated Plate</i> .....	60
4.6 Analisa Elevasi Sumbu Y dan Waktu(Y,t) terhadap <i>Moisture Content</i> .....	63
4.7 Analisa Distribusi <i>Psychrometric Chart</i> .....	63
4.7.1 Analisa <i>Psychrometric Chart</i> pada Variasi Udara Pengering.....	63
4.7.2 Analisa <i>Psychrometric Chart</i> pada Susunan Lubang <i>Perforated Plate</i> .....	65
4.8 Analisa Efektivitas Variasi Kecepatan Inlet.....	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	67
5.1 Kesimpulan .....	67
5.2 Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....	68
LAMPIRAN 1 .....	70
LAMPIRAN 2 .....	71
BIODATA PENULIS.....	83

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Distribusi Batubara di Indonesia.....	1
<b>Gambar 1.2</b> Boiler.....	1
<b>Gambar 2.1</b> Rangkaian Alat Eksperimen.....	4
<b>Gambar 2.2</b> Grafik Pengaruh Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara .....	4
<b>Gambar 2.3</b> Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Pengeringan dengan Variasi Batubara ....	5
<b>Gambar 2.4</b> Grafik <i>Moisture content vs time</i> .....	5
<b>Gambar 2.5</b> Pengaruh Laju Pengeringan Batubara terhadap Penghematan.....	5
<b>Gambar 2.6</b> <i>Boundary Condition</i> Kondisi Chamber Pengering 2D.....	6
<b>Gambar 2.7</b> Perubahan Fluks Perpindahan Massa dan Koefisien Perpindahan Panas terhadap Waktu Pengeringan .....	7
<b>Gambar 2.8</b> Skema Sistem Pengering Batubara <i>Fluidized Bed Coal Dryer</i> .....	8
<b>Gambar 2.9</b> Proses Pengeringan Partikel Pasir Menggunakan <i>Fluidized Bed Dryer</i> .....	9
<b>Gambar 2.10</b> Geometri 3D <i>Fluidized Bed Dryer</i> pada Pengeringan Pasir .....	9
<b>Gambar 2.11</b> Grafik Temperatur Pasir vs <i>Time</i> dengan Variasi Temperatur <i>Inlet</i> .....	9
<b>Gambar 2.12</b> Dimensi <i>Perforated Plate</i> (a) Diameter 5 mm dan (b) 10 mm .....	10
<b>Gambar 2.13</b> Skema Peralatan Eksperimen <i>Fluidized Bed Coal Dryer</i> .....	10
<b>Gambar 2.14</b> <i>Psychrometric Chart</i> pada <i>Perforated Plate</i> 10 mm.....	11
<b>Gambar 2.15</b> Perpindahan Panas pada <i>Inlet</i> 2.5 m/s dan 87°C .....	12
<b>Gambar 2.16</b> Perpindahan Massa pada <i>Inlet</i> 2.5 m/s dan 87°C .....	13
<b>Gambar 2.17</b> Kontur (a) <i>Moisture Content</i> , (b) Kecepatan, dan (c) Temperatur.....	14
<b>Gambar 2.18</b> Grafik MC vs <i>Time Tube Heater</i> Tersusun <i>Staggered</i> dengan Variasi Kecepatan pada Temperatur 55°C.....	14
<b>Gambar 2.19</b> Periode Proses Pengeringan .....	15
<b>Gambar 2.20</b> Bentuk Lubang Perforasi pada <i>Perforated Plate</i> .....	17
<b>Gambar 2.21</b> Pemetaan pada Psikrometrik Chart .....	19
<b>Gambar 2.22</b> Proses Pada Psikometrik Chart .....	20
<b>Gambar 3.1</b> Kerangka Penelitian .....	22
<b>Gambar 3.2</b> Geometri 3D <i>Chamber</i> Pengering Batubara dengan <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> .....	24
<b>Gambar 3.3</b> Geometri 3D <i>Chamber</i> Pengering Batubara dengan <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> .....	24
<b>Gambar 3.4</b> <i>Meshing Chamber</i> Pengering Batubara (a)Tampak Isometrik, (b)Tampak Samping (c) <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> dan (d) <i>Aligned</i> .....	25
<b>Gambar 3.5</b> <i>Define Zones Chamber</i> Pengering Batubara .....	25
<b>Gambar 3.6</b> Flowchart Penelitian.....	30
<b>Gambar 3.7</b> Flowchart Perhitungan .....	32
<b>Gambar 4.1</b> Posisi Pengambilan Bidang.....	38
<b>Gambar 4.2</b> Kontur Temperatur Bidang XY pada <i>Perforated Plate Aligned</i> dengan Variasi Kecepatan .....	39
<b>Gambar 4.3</b> Kontur Temperatur Bidang YZ pada <i>Perforated Plate Aligned</i> dengan Variasi Kecepatan .....	39
<b>Gambar 4.4</b> Kontur Temperatur Bidang XZ pada <i>Perforated Plate Aligned</i> dengan Variasi Kecepatan .....	40
<b>Gambar 4.5</b> Kontur Temperatur Bidang XY pada <i>Perforated Plate Staggered</i> dengan Variasi Kecepatan .....	40
<b>Gambar 4.6</b> Kontur Temperatur Bidang YZ pada <i>Perforated Plate Staggered</i> dengan Variasi Kecepatan .....	41

<b>Gambar 4.7</b> Kontur Temperatur Bidang XZ pada <i>Perforated Plate Staggered</i> dengan Variasi Kecepatan .....	42
<b>Gambar 4.8</b> Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O Bidang XY pada <i>Perforated Plate Aligned</i> dengan Variasi Kecepatan .....	42
<b>Gambar 4.9</b> Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O Bidang YZ pada <i>Perforated Plate Aligned</i> dengan Variasi Kecepatan .....	43
<b>Gambar 4.10</b> Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O Bidang XZ pada <i>Perforated Plate Aligned</i> dengan Variasi Kecepatan .....	43
<b>Gambar 4.11</b> Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O Bidang XY pada <i>Perforated Plate Staggered</i> dengan Variasi Kecepatan .....	44
<b>Gambar 4.12</b> Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O Bidang YZ pada <i>Perforated Plate Staggered</i> dengan Variasi Kecepatan .....	45
<b>Gambar 4.13</b> Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O Bidang XZ pada <i>Perforated Plate Staggered</i> dengan Variasi Kecepatan .....	45
<b>Gambar 4.14</b> Kontur Temperatur Bidang (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ dengan Variasi <i>Perforated Plate</i> .....	47
<b>Gambar 4.15</b> Kontur Fraksi Massa H <sub>2</sub> O Bidang (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ dengan Variasi <i>Perforated Plate</i> .....	49
<b>Gambar 4.16</b> Posisi Pengambilan (a) Bidang dan (b) Titik .....	50
<b>Gambar 4.17</b> Grafik Distribusi (a) Temperatur dan (b) Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada Kecepatan 1,6 m/s dan <i>Perforated Plate Staggered Plane XY</i> .....	51
<b>Gambar 4.18</b> Grafik Distribusi Temperatur pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi Kecepatan dengan <i>Perforated Plate Tersusun Aligned</i> .....	52
<b>Gambar 4.19</b> Grafik Distribusi Temperatur pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi Kecepatan dengan <i>Perforated Plate Tersusun Staggered</i> .....	52
<b>Gambar 4.20</b> Grafik Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi Kecepatan dengan <i>Perforated Plate Tersusun Aligned</i> .....	53
<b>Gambar 4.21</b> Grafik Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi Kecepatan dengan <i>Perforated Plate Tersusun Staggered</i> .....	54
<b>Gambar 4.22</b> Grafik Distribusi Temperatur pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi <i>Perforated Plate</i> dengan Kecepatan 1,6 m/s .....	55
<b>Gambar 4.23</b> Grafik Distribusi Temperatur pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi <i>Perforated Plate</i> dengan Kecepatan 2 m/s .....	56
<b>Gambar 4.24</b> Grafik Distribusi Temperatur pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi <i>Perforated Plate</i> dengan Kecepatan 2,4 m/s .....	56
<b>Gambar 4.25</b> Grafik Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi <i>Perforated Plate</i> dengan Kecepatan 1,6 m/s .....	57
<b>Gambar 4.26</b> Grafik Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi <i>Perforated Plate</i> dengan Kecepatan 2 m/s .....	58
<b>Gambar 4.27</b> Grafik Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O pada <i>Plane</i> (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ Variasi <i>Perforated Plate</i> dengan Kecepatan 2,4 m/s .....	58
<b>Gambar 4.28</b> Grafik Perubahan <i>Moisture Content Average</i> terhadap Waktu .....	59
<b>Gambar 4.29</b> Grafik Perubahan <i>Moisture Content Average</i> Variasi Kecepatan pada <i>Perforated Plate Tersusun</i> (a) <i>Aligned</i> dan (b) <i>Staggered</i> .....	59
<b>Gambar 4.30</b> Grafik Perubahan <i>Moisture Content Average</i> Variasi Susunan <i>Perforated Plate</i> pada Kecepatan (a) 1,6 m/s, (b) 2 m/s, dan (c) 2.4 m/s .....	61
<b>Gambar 4.31</b> Posisi Pengambilan Nilai pada Elevasi Y .....	61
<b>Gambar 4.32</b> Grafik Elevasi Y Fungsi Waktu terhadap <i>Moisture Content</i> dengan Variasi Kecepatan (a) 1,6 m/s, (b) 2 m/s, dan (c) 2.4 m/s <i>Perforated Plate Aligned</i> .....	61

<b>Gambar 4.33</b>	Grafik Elevasi Y Fungsi Waktu terhadap <i>Moisture Content</i> dengan Variasi Kecepatan (a)1,6 m/s, (b)2 m/s, dan (c)2.4 m/s <i>Perforated Plate Staggered</i> .....	61
<b>Gambar 4.34</b>	<i>Plane Average</i> untuk Pengambilan Nilai Temperatur dan <i>Relative Humidity</i> ..	63
<b>Gambar 4.35</b>	Hasil <i>Psychrometric Chart</i> .....	63
<b>Gambar 4.36</b>	<i>Psychrometric Chart</i> Variasi Kecepatan <i>Inlet</i> pada <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> dan <i>Staggered</i> .....	63
<b>Gambar 4.37</b>	<i>Psychrometric Chart</i> Variasi <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> dan <i>Staggered</i> pada Kecepatan <i>Inlet</i> 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s .....	65
<b>Gambar 4.38</b>	Grafik Efektivitas Terhadap Waktu .....	65

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Metode Komputasi.....	12
<b>Tabel 2.2</b> Pengelompokkan Mesin Pengering .....	16
<b>Tabel 3.1</b> Geometri 3D <i>Chamber</i> Pengering Batubara.....	23
<b>Tabel 3.2</b> <i>Solver</i> ANSYS Fluent 19.2.....	26
<b>Tabel 3.3</b> <i>Models</i> ANSYS Fluent 19.2 .....	26
<b>Tabel 3.4</b> <i>Boundary Conditions</i> ANSYS Fluent 19.2.....	26
<b>Tabel 3.5</b> <i>Solution Methods</i> Fluent 19.2.....	28
<b>Tabel 4.1</b> Data Perhitungan.....	34
<b>Tabel 4.2</b> Data dari Fluent 19.2 .....	35
<b>Tabel 4.3</b> Data untuk Perhitungan Validasi .....	36
<b>Tabel 4.4</b> Tabel Validasi <i>Psychrometric Chart</i> dengan Perhitungan.....	37
<b>Tabel 4.5</b> Tabel Validasi <i>h</i> Simulasi dan <i>h</i> Perhitungan .....	38
<b>Tabel 1</b> Certificate of Sampling and Analysis Batubara.....	70
<b>Tabel 2</b> Data Hasil Simulasi Fluent .....	71
<b>Tabel 3</b> Data Hasil Perhitungan .....	73
<b>Tabel 4</b> Data Nilai Distribusi Temperatur .....	75
<b>Tabel 5</b> Data Nilai Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O.....	78
<b>Tabel 6</b> Data <i>Psychrometric Chart</i> .....	81
<b>Tabel 7</b> Data <i>Moisture Content</i> per Elevasi Y .....	82



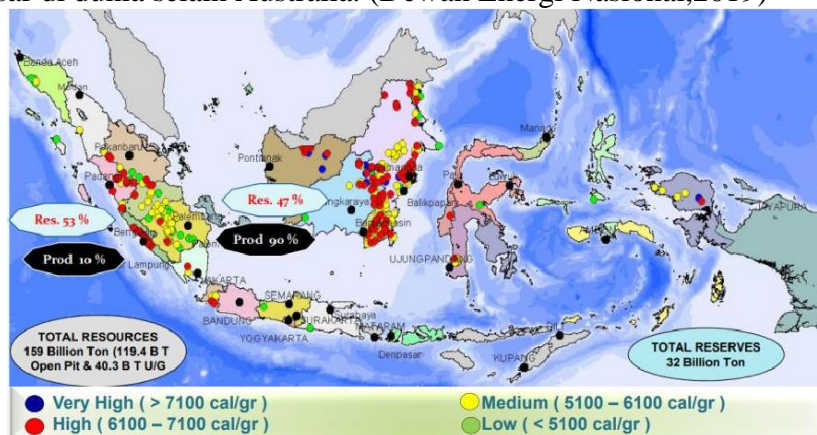
## DAFTAR SIMBOL

A	= Luas area	m <sup>2</sup>
Ar	= <i>Archimedes number</i>	
c <sub>p</sub>	= <i>Specific heat</i>	J/kg.K
d	= diameter	m
D <sub>AB</sub>	= <i>Binary mass diffusivity</i>	m <sup>2</sup> /s
g	= Percepatan gravitasi	m/s <sup>2</sup>
h	= <i>Convection heat transfer coefficient</i>	W/m <sup>2</sup> .K
h <sub>m</sub>	= <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>	
mf	= fraksi massa	
N''	= <i>Molar flux</i> uap air	kmol/m <sup>2</sup> .s
n''	= <i>Mass flux</i> uap air	kg/m <sup>2</sup> .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
<b><i>Greek Symbols</i></b>		
α	= Difusivitas termal	m <sup>2</sup> /s
Δ	= Perubahan	
μ	= Viskositas dinamik	kg/m.s
ν	= Viskositas kinematic	m <sup>2</sup> /s
ρ	= Massa jenis	kg/m <sup>3</sup>
Ø	= <i>Relative humidity</i>	%
ω	= <i>Humidity ratio</i>	
<b><i>Subscripts</i></b>		
g	= Gas	
H <sub>2</sub> 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>Ambient</i>	

# BAB I PENDAHULUAN

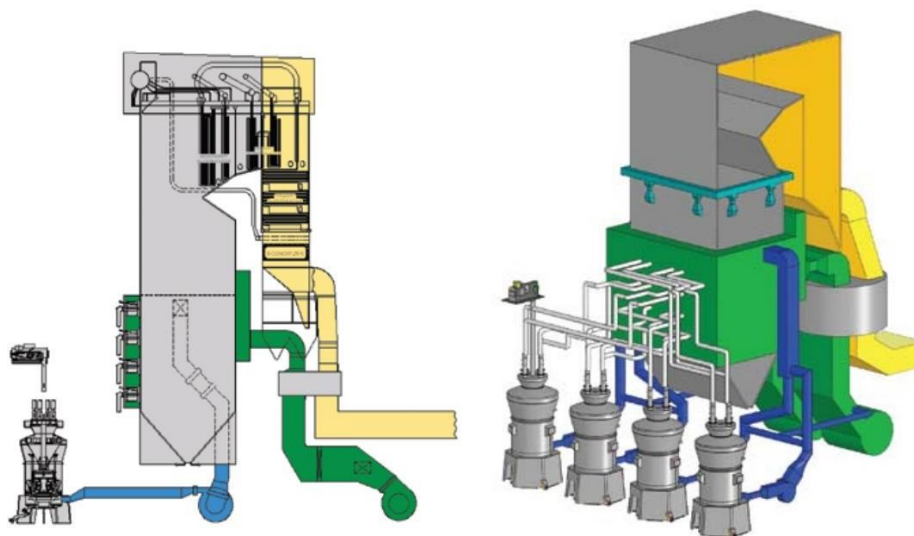
## 1.1 Latar Belakang

Produksi batubara di Indonesia diperkirakan terus meningkat, utamanya untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (pembangkit listrik maupun industri) serta permintaan luar negeri (ekspor). Produksi batubara ini akan terus berkembang, berdasarkan data pada tahun 2009-2018 mengalami peningkatan yang cukup besar, dimana capaian produksi pada tahun 2018 sebesar 557 juta ton. Dari total produksi tersebut, porsi ekspor batubara mencapai 357 juta ton (63%) dan sebagian besar digunakan untuk memenuhi permintaan China dan India. Tingginya angka ekspor batubara Indonesia menjadikan Indonesia sebagai salah satu eksportir batubara terbesar di dunia selain Australia. (Dewan Energi Nasional, 2019)



**Gambar 1.1** Distribusi Batubara di Indonesia

Batubara masih menjadi penyedia energi tertinggi diantara yang lainnya, dimana batubara tersebut sering digunakan pada salah satu sektor yakni industri. Sektor industri pada tahun 2019 mengonsumsi energi sebanyak 389,4 Juta SBM dengan jenis energi batubara, gas, dan listrik, selain minyak solar dan minyak bakar. Pada tahun 2050 diperkirakan ketiga jenis energi tersebut tetap mendominasi kebutuhan energi di sektor industri. Kebutuhan energi sektor industri diproyeksikan meningkat dengan laju pertumbuhan rata-rata 3,9% per tahun menjadi 1.279,5 juta SBM pada tahun 2050. (PPIPE dan BPPT, 2021)



**Gambar 1.2** Boiler

Dari peta persebaran batubara pada gambar 1.1 di Indonesia memiliki potensi yang besar dalam produksi batubara. Namun, sekitar 90,74% batubara yang diperoleh kalorinya antara sedang ke rendah contohnya seperti lignite dan bituminous sedangkan PLTU membutuhkan batubara kalori tinggi dengan *high heating value* serta dibutuhkan kandungan air batubara sekitar 2-15% agar efisiensinya tinggi, emisinya semakin rendah, dan juga ramah lingkungan. Hal ini tidak dapat dihindari, karena harga dari batubara dengan kalori tinggi juga mahal dan mayoritas produksi batubara Indonesia yakni *low rank calorie*, dan jika tetap memakai batubara dengan kalori yang lebih rendah mengakibatkan *pulverizer mill* akan semua beroperasi secara maksimal artinya tidak ada yang *standby*. Jika tidak, *pulverizer* akan bekerja semua tanpa ada yang *standby* mengakibatkan apabila rusak atau membutuhkan *maintenance* akan menghambat kerja PLTU sehingga mengalami kerugian yang besar. Indonesia sendiri masih menggunakan batubara kalori rendah dalam PLTU, dengan menggunakan teknologi yang dinamakan *coal dryer* yaitu dengan melakukan pengeringan untuk mengubah batubara yang memiliki kalori rendah dan sedang menjadi batubara *high calorie*. Maka setelah dilakukan *coal drying* akan mengurangi *moisture content* seiring juga dengan bertambahnya nilai kalorinya.

Berdasarkan penelitian dari Edward K. Levy, dkk (2006) yang menggunakan variasi batubara berbeda pada eksperimen pengeringan batubara menghasilkan naiknya laju pengeringan jika temperatur dan kecepatan udara panas di *inlet* juga meningkat. Untuk Jibin Antony dan M.B. Shyamkumar (2016) melakukan studi numerik CFD secara transien dengan variasi temperatur dengan tambahan *perforated plate*, dimana hasilnya kenaikan temperatur akan berpengaruh pada nilai *moisture content* yang semakin kecil. Al Velian Suci Hadi Widarwis (2018) melakukan suatu eksperimen menggunakan variasi ukuran diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm serata kecepatan fluidisasi, memperoleh hasil diameter lubang yang lebih kecil dan semakin besar kecepatan fluidisasi akan menghasilkan laju pengeringan yang lebih cepat.

Maka dari itu, berdasarkan latar belakang dilakukan analisa secara numerik menggunakan perangkat lunak Gambit 2.4.6 untuk membuat pemodelan serta *meshing* secara 3D serta untuk menjalankan simulasi dengan ANSYS 19.2 untuk mengidentifikasi karakteristik *fluidized bed coal dryer*. Variasi yang ada dalam penelitian ini meliputi kecepatan *inlet* 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s serta susunan dari *perforated plate* yang terdiri atas *aligned* dan *staggered*. Harapannya ketika dilakukan maka kualitas dari batubara dimana kondisi awal adalah *low calorie* nantinya akan berkurang kandungan airnya sehingga terjadi peningkatan nilai kalorinya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kecepatan fluidisasi *inlet* udara pengering terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*?
2. Bagaimana pengaruh variasi susunan *perforated plate* secara *staggered* dan *aligned* terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*?
3. Bagaimana proses pengeringan batubara berdasarkan *psychrometric chart*?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian tertera dibawah ini:

1. Pemodelan dibuat secara 3D dengan menggunakan *software* Gambit 2.4.6.
2. Disimulasikan dengan *software* ANSYS Fluent 19.2.
3. Proses pengeringan hanya terjadi pada permukaan batubara.
4. Pemasalahan hanya dibatasi pada *drying chamber* yang bersifat adiabatik.
5. Proses perpindahan panas dan analisa laju pengeringan dalam kondisi *steady state*.
6. Fluida yang digunakan pada udara pengering diasumsikan sebagai gas ideal.

7. Geometri *drying chamber*, lubang di *perforated plate*, dan batubara adalah segiempat.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun beberapa tujuan dari penelitian ini yaitu meliputi:

1. Untuk mengetahui pengaruh kecepatan fluidisasi *inlet* udara pengering terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi susunan *perforated plate* secara *staggered* dan *aligned* terhadap karakteristik laju pengeringan pada *fluidized bed coal dryer*.
3. Untuk mengetahui proses pengeringan batubara berdasarkan *psychrometric chart*.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian yang dilakukan ini adalah:

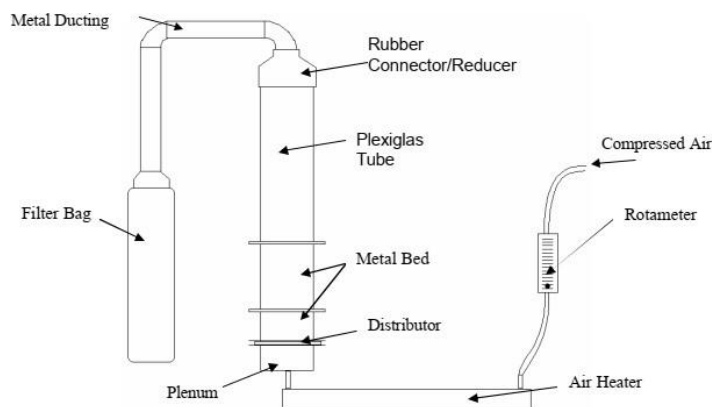
1. Bagi penulis untuk pengaplikasian ilmu yang didapatkan selama kuliah di Teknik Mesin ITS serta menyelesaikan mata kuliah proposal dan tugas akhir.
2. Meningkatkan pemahaman tentang karakteristik *fluidized bed coal dryer* yang berguna untuk meningkatkan nilai kalor dan menurunkan *moisture content* dari batubara.
3. Penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan dari pengoperasian *fluidized bed coal dryer*.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

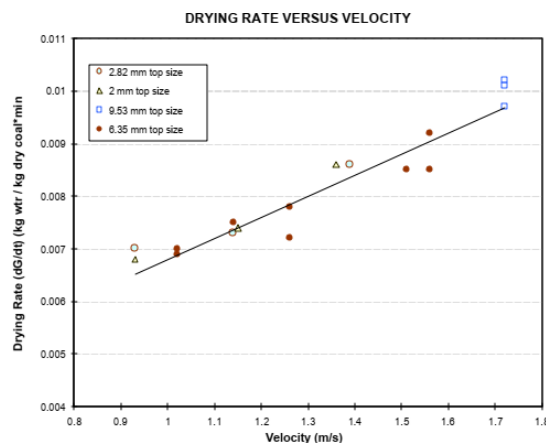
#### 2.1.1 Edward K. Levy, dkk (2006)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Levy, dkk (2006) yang berjudul “*Use of Coal Drying to Reduce Waterconsumed in Pulverized Coal Power Plants*” dimana melakukan penelitian terhadap efek pengeringan batubara dalam upaya untuk mengurangi kandungan air dalam batubara. Levy dkk merancang sebuah peralatan eksperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara. Pengujian alat eksperimen dilakukan dalam naungan Riset Energi *Center Fluidized Bed Laboratory*. Ruang pengeringan bertipe *fluidized bed* dengan diameter 6 inchi. Udara pemanas dirancang mencapai suhu 150°F dengan *velocity inlet* mencapai 1.6 m/s.



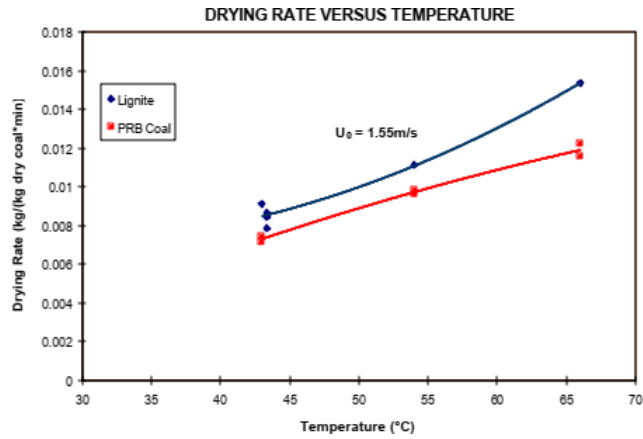
**Gambar 2.1** Rangkaian Alat Eksperimen

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

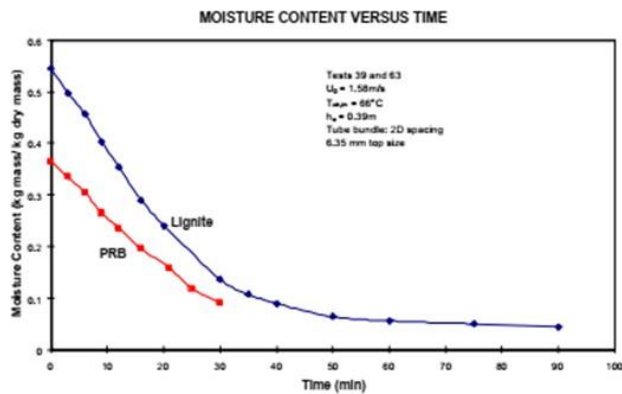


**Gambar 2.2** Grafik Pengaruh Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara

Berdasarkan eksperimen pada penelitian yang dilaksanakan, didapat data bahwa kecepatan udara pemanas pada sisi *inlet chamber* pengering dapat berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Pada penelitian ini kecepatan udara pemanas pada sisi *inlet* akan meningkatkan laju pengeringan batubara apabila kecepatan ditingkatkan hingga nilai tertentu.

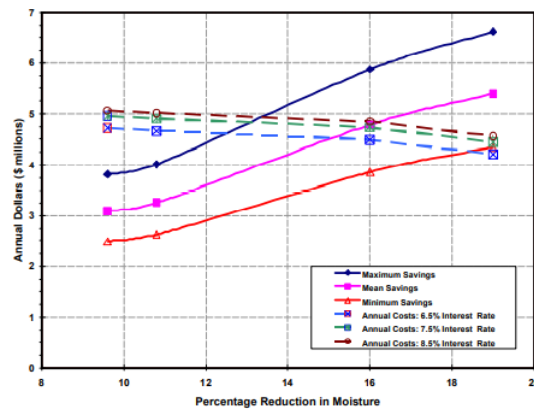


**Gambar 2.3** Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Pengeringan dengan Variasi Batubara



**Gambar 2.4** Grafik *Moisture content vs time*

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

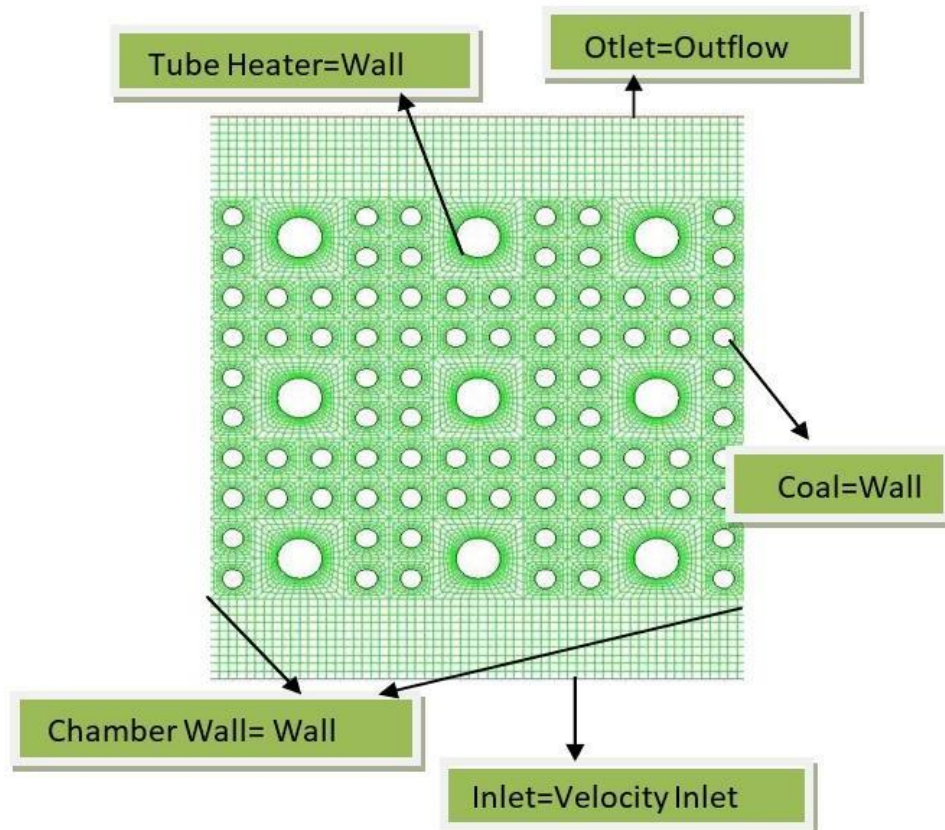


**Gambar 2.5** Pengaruh Laju Pengeringan Batubara terhadap Penghematan

Pada penelitian yang dilakukan juga didapatkan pengaruh dari temperatur udara pemanas yang dilewatkan pada ruang pengering. Temperatur udara pemanas divariasikan pada rentang suhu 43°C hingga 66°C dengan batubara jenis *lignite* dan *Powder River Basin* (PRB). Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya temperatur udara pemanas maka akan meningkatkan laju pengeringan batubara. (Levy, dkk, 2006)

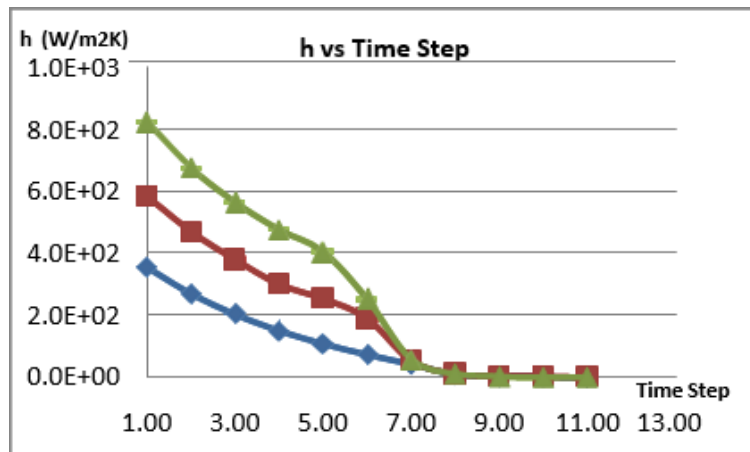
### 2.1.2 Andi Kurniawan (2012)

Andi Kurniawan pada tahun 2012 melakukan penelitian yang berjudul “Studi Numerik Pengaruh Variasi Temperatur Air Heater terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara pada *Fluidized Bed Coal Dryer* dengan *Tube Heater Tersusun Aligned*”. Pada penelitian tersebut sesuai dengan judul, suatu pengering batubara dimodelkan secara dua dimensi menggunakan metode numerik. Hasil dari penelitian ini dapat diketahui karakteristik pengeringan pada ruang pengering batubara tipe *fluidized bed*. Hasil *post processing* kuantitatif menunjukkan peningkatan temperatur *air heater* diikuti dengan peningkatan koefisien perpindahan panas dan massa serta laju perpindahan massa. Pengurangan laju *moisture content* terbesar didapatkan pada temperatur *air heater* 339K diikuti temperatur 327K serta 316K. (Kurniawan, 2012)

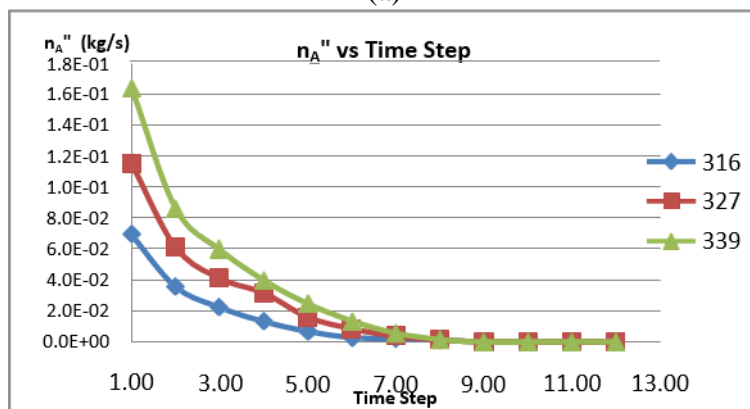


**Gambar 2.6** Boundary Condition Kondisi Chamber Pengering 2D

Semakin tinggi temperature *air heater* akan diikuti dengan peningkatan nilai koefisien perpindahan panas dan koefisien perpindahan massa. Pada penelitian ini laju perpindahan massa *moisture content* batubara ke udara pengering mencapai nilai terbesar pada temperatur air heater 339K kemudian 327K dan 316K. (Kurniawan, 2012)



(a)



(b)

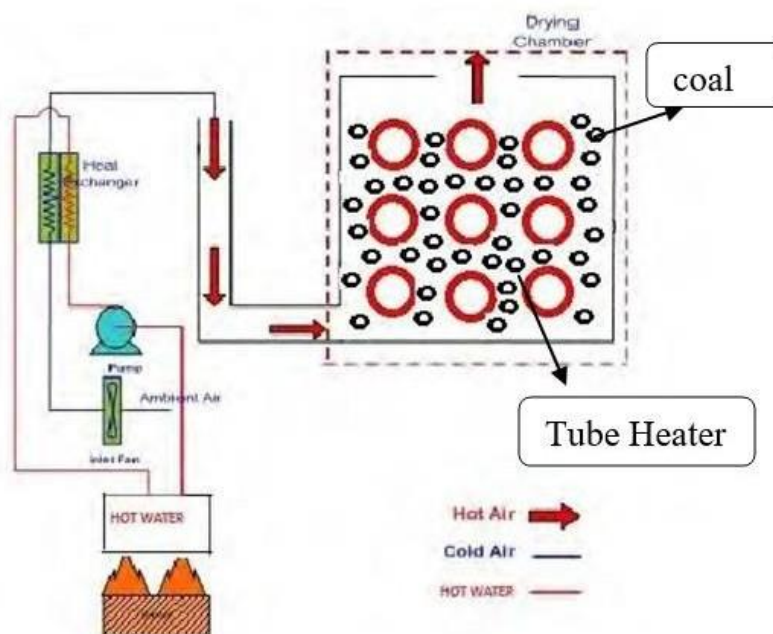
**Gambar 2.7** Perubahan Fluks Perpindahan Massa dan Koefisien Perpindahan Panas terhadap Waktu Pengeringan

Berdasarkan grafik 2.7 yang didapatkan trend grafik perubahan fluks perpindahan massa terhadap waktu pengeringan pada setiap temperatur *inlet*. Trend grafik menunjukkan terjadi penurunan yang sangat signifikan pada perubahan fluks perpindahan massa terhadap waktu. Trend grafik pada ketiga parameter temperatur *inlet* 316 K, 327 K dan 339 K turun secara linier mulai percobaan awal hingga percobaan ketiga. Grafik mengalami penurunan secara eksponensial pada perubahan koefisien fluks perpindahan massa pada percobaan ketiga hingga percobaan keempat. Pada kondisi percobaan keempat hingga keenam perubahan fluks perpindahan massa sudah dalam kondisi linier dan konstan terhadap waktu. Trend grafik fluks perpindahan massa identik dengan grafik koefisien perpindahan massa pada fluidized bed coal dryer. Secara teoritis koefisien perpindahan massa akan memengaruhi nilai fluks perpindahan massa. Nilai koefisien perpindahan massa berbanding lurus dengan perpindahan massa sehingga ketika nilai perpindahan massa meningkat akan diikuti dengan peningkatan fluks perpindahan massa. (Kurniawan, 2012)

Selanjutnya untuk grafik 2.7 yang bawah, didapatkan *trend* grafik perubahan koefisien perpindahan panas terhadap waktu pengeringan pada setiap temperatur *inlet*. Pada grafik memperlihatkan terjadi penurunan yang sangat signifikan pada perubahan koefisien perpindahan panas terhadap waktu. Trend grafik pada ketiga parameter temperatur *inlet* 316 K, 327 K dan 339 K turun secara linier mulai percobaan awal hingga percobaan ketiga. Grafik mengalami penurunan secara eksponensial pada perubahan koefisien perpindahan panas pada percobaan ketigahingga percobaan keempat. Pada kondisi percobaan keempat



hingga keenam perubahan koefisien perpindahan massa sudah dalam kondisi linier terhadap waktu.

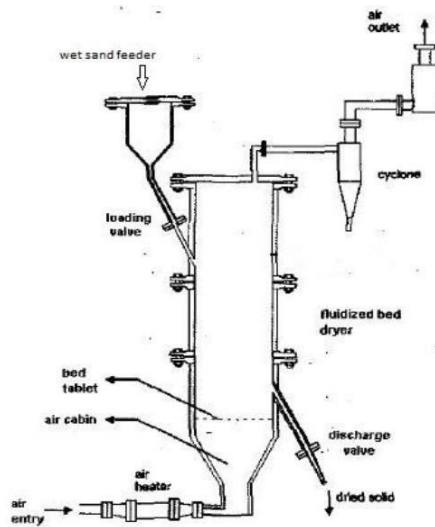


**Gambar 2.8** Skema Sistem Pengering Batubara *Fluidized Bed Coal Dryer*

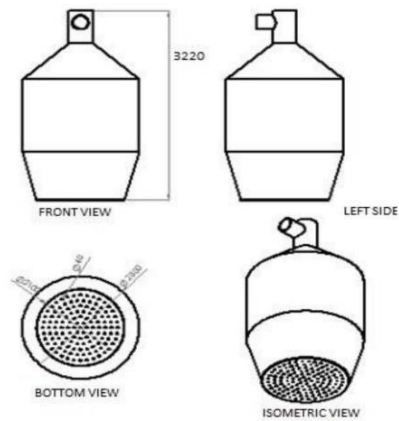
Proses *heating* pada tube heater dengan susunan *aligned*, mengakibatkan proses pemanasan disertai humidifikasi yang ditandai dengan peningkatan temperatur udara di sekitar tube heater dan diikuti dengan peningkatan nilai *humidity rationya*. Proses *heating* oleh *tube heater* dengan susunan *aligned* mengakibatkan penurunan *relative humidity* udara di sekitar *tube heater* dan bernilai lebih kecil dibandingkan nilai *relative humidity* batubara di sekitar *tube heater*. Peningkatan *humidity ratio* terjadi akibat konsentrasi perpindahan massa/*moisture content* batubara di sekitar *tube heater*. (Kurniawan, 2012)

### 2.1.3 Jibin Antony dan M.B. Shyamkumar (2016)

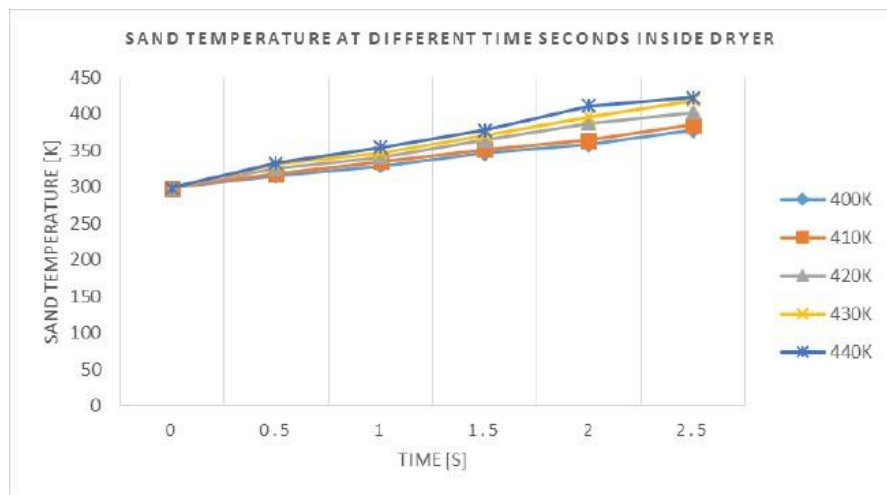
Penelitian dari Jibin Antony dan M.B. Shyamkumar (2016) melakukan pengeringan partikel pasir menggunakan *Fluidized Bed Dryers* (FBD), dimana memiliki kelebihan dibandingkan metode pengeringan lainnya. Pada penelitian ini, pengeringan partikel pasir menggunakan Fluidized Bed Dryer disimulasikan menggunakan ANSYS FLUENT 14.5. Simulasi didasarkan pada pendekatan model multifase Eulerian-Eulerian yaitu secara transien. Kontur fraksi volume pasir dari waktu ke waktu pada bidang tengah di dalam FBD dipantau pada suhu udara masuk 400 K. Simulasi selanjutnya dilakukan dengan variasi temperatur *inlet*. Saat suhu udara masuk meningkat, waktu pengeringan akan semakin cepat. Dari simulasi didapatkan hasil yaitu suhu dan kecepatan udara *outlet* diperoleh sesuai dengan data eksperimen yang diperoleh dari Mineral Separation (MS) Unit of Kerala Minerals and Metals Limited (KMML), Kollam.



**Gambar 2.9** Proses Pengeringan Partikel Pasir Menggunakan *Fluidized Bed Dryer*



**Gambar 2.10** Geometri 3D *Fluidized Bed Dryer* pada Pengeringan Pasir



**Gambar 2.11** Grafik Temperatur Pasir vs *Time* dengan Variasi Temperatur *Inlet*

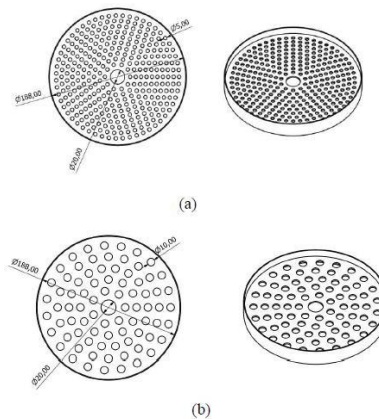
Dari Gambar 2.8 terlihat bahwa temperatur udara di *inlet* meningkat, maka temperatur partikel pasir di dalam pengering juga meningkat. Pada temperatur *inlet* 400 K, partikel pasir mencapai 373 K sekitar 2,5 detik di dalam *chamber* pengering. Selain itu, pada

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.

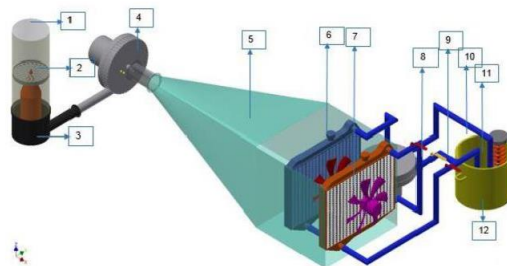
Kesimpulan dari studi CFD yaitu perbandingan hasil terhadap eksperimen sama, untuk temperatur *outlet* dan kecepatan udara pengering *outlet*. Dengan meningkatnya temperatur *inlet*, temperatur partikel pasir di dalam pengering juga meningkat. Saat temperatur *inlet* meningkat, laju pengeringan partikel pasir juga meningkat. (Antony, 2016)

#### 2.1.4 Al Velian Suci Hadi Widarwis (2018)

Penelitian yang dilakukan oleh Widarwis (2018) adalah berupa pelaksanaan eksperimen menggunakan serangkaian alat yang didesain untuk mengeringkan batubara dengan udara panas sebagai media pengering. Dengan memvariasikan diameter dari lubang *perforated plate* yaitu 5 mm dan 10 mm dengan luasan yang sama dalam *drying chamber* pada *bed coal dryer*. Juga diberikan kecepatan *inlet* yang berbeda yaitu 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s dan beban pengeringan tetap senilai 300 gram.



**Gambar 2.12** Dimensi *Perforated Plate* (a) Diameter 5 mm dan (b) 10 mm

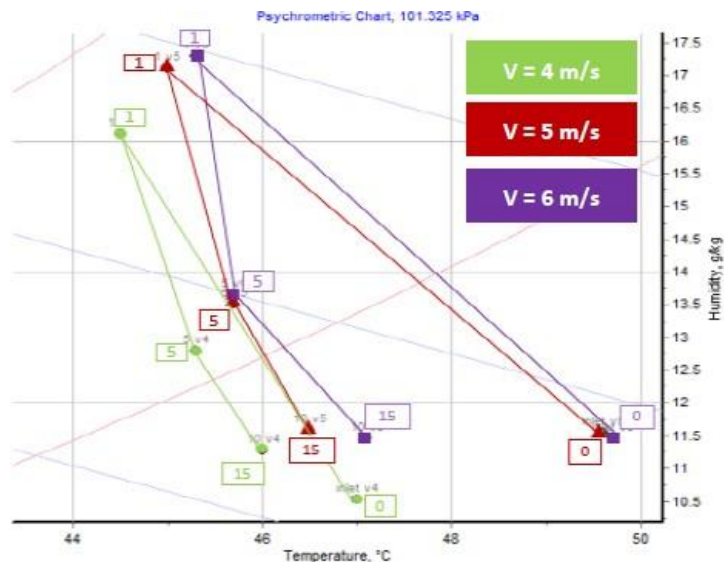


Keterangan:

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Dinding <i>drying chamber</i> | 8. Kran saluran                  |
| 2. <i>Perforated plate</i>       | 9. Saluran air radiator ke drum  |
| 3. <i>Body</i> bawah             | 10. Saluran air drum ke radiator |
| 4. <i>Centrifugal blower</i>     | 11. <i>Heater</i>                |
| 5. Pengarah udara                | 12. Drum                         |
| 6. <i>Radiator</i>               |                                  |
| 7. Kipas radiator                |                                  |

**Gambar 2.13** Skema Peralatan Eksperimen *Fluidized Bed Coal Dryer*

Langkah pertama, batubara dipecahkan menjadi bentuk granular dengan rata-rata diameter sebesar  $\pm 6,5$  mm. Pengambilan sampel batubara dilakukan tiap 1 menit hingga menit ke-5 kemudian dilanjutkan hingga menit ke-15 dengan interval 2 menit. Selanjutnya, untuk mendapatkan nilai *moisture content* pada batubara maka akan dilakukan pengeringan lebih lanjut menggunakan oven pada temperatur 105°C selama 180 menit. Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan, proses pengeringan yang paling cepat pada menit ke 1 hingga 7 yaitu pada kecepatan 6 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm. Hal ini dikarenakan pada tiap 1 inch<sup>2</sup> *perforated plate* diameter 5 mm mencakup lebih banyak lubang jika dibandingkan dengan diameter 10 mm. Didapatkan nilai *temperature outlet* sebesar 49,7°C, nilai *relative humidity* terendah 16,1% pada akhir proses. Selain itu penurunan *moisture content* mencapai 15,78% pada menit ke-15 dengan nilai *drying rate* rata-rata sebesar 5,3 gr/menit. Total massa air yang dapat dilepaskan batubara sebesar 58,0121 gram dengan nilai koefisien perpindahan massa 0,06 m/s dan koefisien perpindahan panas sebesar 102,48 W/m<sup>2</sup> K. Namun, pada menit 9 hingga akhir pengeringan didapatkan nilai laju pengeringan yang relatif sama pada tiap variasi kecepatan. Sehingga, pada menit 9 disarankan menggunakan kecepatan yang diturunkan perlahan dari 5 m/s dan 4 m/s untuk menghemat energi yang digunakan. (Widarwis, 2018)



**Gambar 2.14** Psychrometric Chart pada Perforated Plate 10 mm

Kondisi awal udara pengering sisi *outlet* ditunjukkan pada titik 0, setelah melewati batubara yang dikeringkan selama 1 menit, titiknya bergerak ke 1 menuju kiri atas yang artinya mengalami proses *sensible cooling and humidifying*. Lalu menit selanjutnya bergerak terus hingga mendekati titik 0. Pergerakan ke arah kanan bawah dari titik 1 menuju titik berikutnya bukanlah merupakan proses *sensible heating and dehumidifying*, dari grafik tersebut menggambarkan jumlah selisih uap air yang terbawa oleh udara selama 5 menit pertama hingga 15 menit waktu pengeringan. (Widarwis, 2018)

### 2.1.5 Elfito Yohana, dkk (2020)

Penelitian yang dilakukan oleh Elfito Yohana (2020) yang berjudul “3D Simulation on Convective Drying Process for Cylindrical Tea Particle Using CFD Software to Analyze The Heat and Mass Transfer Phenomena”. Jenis proses pengeringan sendiri terdapat beberapa, yaitu ada pengeringan konvektif, pengeringan tidak langsung atau pengeringan kontak, pengeringan listrik atau *microwave*, pengeringan beku dan pengeringan udara alami.

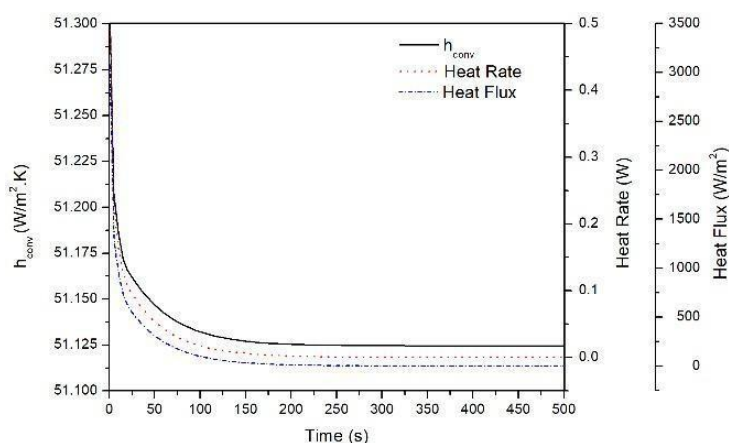
Pengeringan konvektif adalah metode pengeringan yang paling banyak digunakan di industri seperti sebagai pertanian, makanan industri, bangunan bahan, keramik industri, kertas industri, pertambangan limbah perlakuan, dan sebagainya. Secara umum proses pengeringan konveksi dipengaruhi oleh temperatur udara masuk, kecepatan aliran udara, itu koefisien dari pemindahan dan lain sebagainya. Karena itu, dia adalah diperlukan ke menganalisa properties pada pengeringan konveksi.

Untuk memecahkan masalah dalam pengeringan konveksi yang berkaitan dengan distribusi suhu dan kelembaban di tempat lembab benda memiliki pernah dilakukan. Dikembangkan menjadi model numerik dari panas dan massa transfer selama pengeringan konvektif dari objek lembab persegi panjang 2D dan silinder dengan kondisi batas konvektif dan variabel panas koefisien transfer bersama produk permukaan.

Pada penelitian ini, menerapkan prinsip konveksi pengeringan pada the yang dikeringkan, pengolahan teh dulu dimodelkan di berbentuk silinder partikel dan disimulasikan menggunakan *software* CFD. Tujuan dari pemodelan adalah untuk mengetahui distribusi temperatur teh dan kemudian menghitungnya untuk menentukan kecepatan aliran dan suhu optimal untuk meningkatkan kualitas teh diproduksi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan waktu pengeringan yang efektif dan menentukan laju pengeringan tercepat, mencari panas koefisien perpindahan.

**Tabel 2.1** Metode Komputasi

Parameter	
Computational Domain	$p : l : t = 3 : 1 : 1$
General Setting	- Pressure-Based Transient
Model	- Energy Equation: Active - Viscous Model: Laminar - Species Transport: Active
Material	Air: Mixture-Template (H <sub>2</sub> O-Air)
Boundary Conditions	- Inlet: Velocity Inlet - Outlet: Pressure Outlet

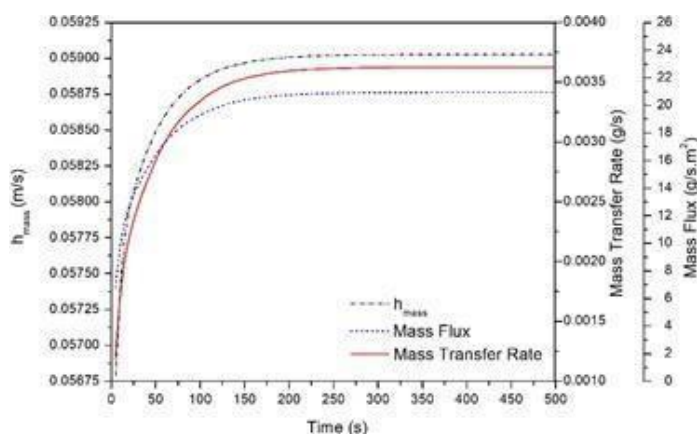


**Gambar 2.15** Perpindahan Panas pada *Inlet* 2.5 m/s dan 87°C

Pada gambar 2.14 dapat dilihat perpindahan panas pada variasi kecepatan masuk 2,5 m/s dan suhu masuk 87°C (360K). Nilai koefisien perpindahan panas pada awal pengeringan adalah 51,317 W/m<sup>2</sup>K, nilai ini akan terus berlanjut menurun dan akan terus mendekati nilai 51,125 W/m<sup>2</sup>K. Dari koefisien perpindahan panas, maka laju perpindahan panas yang terjadi

selama pengeringan teh menggunakan Hukum Pendinginan Newton, dimana pada awal laju pengeringan perpindahan panas adalah  $0,533 \text{ W}$  dan terus menurun secara signifikan sehingga tidak terjadi perpindahan panas setelah pengeringan teh sekitar 506 detik. Selain itu juga dapat ditentukan laju perpindahan panas per satuan luas yang terjadi pada saat pengeringan teh atau yang disebut heat flux. Nilai fluks panas pada awal pengeringan bernilai  $3079,035 \text{ W/m}^2$  dan mencapai nilai  $0 \text{ W/m}^2$  ketika tidak ada lagi perpindahan panas yang terjadi pada proses pengeringan. Hal ini dikarenakan suhu permukaan teh sudah mencapai suhu maksimal  $87^\circ\text{C}$  sehingga tidak terjadi perbedaan di antara itu permukaan suhu itu teh untuk masuk suhu. (Yohana, 2020)

Langkah selanjutnya adalah menghitung perpindahan massa yang terjadi selama pengeringan teh. Hasil perhitungan berupa koefisien perpindahan massa, laju perpindahan massa, dan laju perpindahan massa per satuan luas (fluks massa) terhadap waktu pengeringan yang adalah kemudian dibuat ke dalam grafik seperti yang ditampilkan pada gambar 2.15.



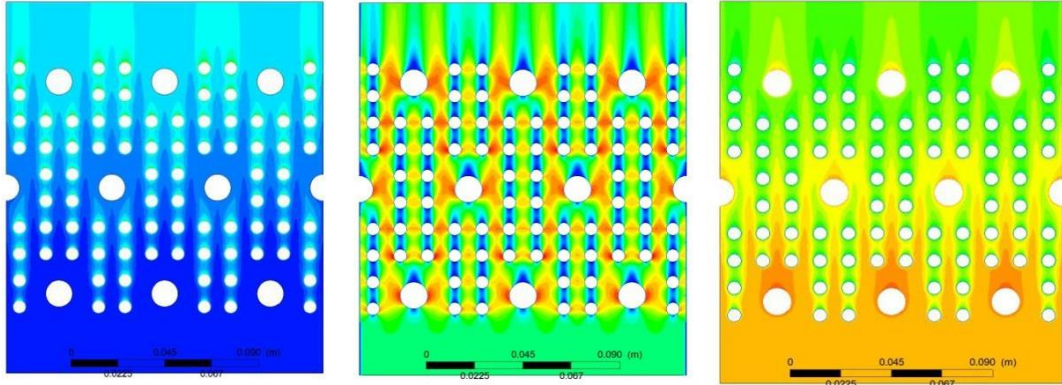
**Gambar 2.16** Perpindahan Massa pada *Inlet* 2.5 m/s dan  $87^\circ\text{C}$

Untuk gambar dilihat bahwa perpindahan massa pada variasi kecepatan masuk 2,5 m/s dan suhu masuk  $87^\circ\text{C}$  (360 K). Pada pengeringan kedua kelima koefisien perpindahan massa bernilai  $5,679 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ , perpindahan massa kecepatan adalah  $1.177 \cdot 10^{-3} \text{ gr/dtk}$ , dan itu massa transfer kecepatan per satuan daerah (massa aliran) adalah  $6.799 \text{ gr/sm}^2$ . Ini nilai akan melanjutkan meningkat secara signifikan dan akan konstan mendekati nilai maksimum setelah pengeringan teh dilakukan selama kurang lebih 506 detik. Koefisien perpindahan massa maksimum adalah  $5.903 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ , laju perpindahan massa maksimum adalah  $3.626 \cdot 10^{-3} \text{ gr/s}$ , dan laju perpindahan massa maksimum per satuan luas (fluks massa) adalah  $20.936 \text{ gr/sm}^2$ . Nilai maksimum disebabkan oleh itu suhu dari itu teh permukaan memiliki tercapai sebuah maksimum suhu dari  $87^\circ\text{C}$  jadi itu di sana adalah Tidak perbedaan. (Yohana, 2020)

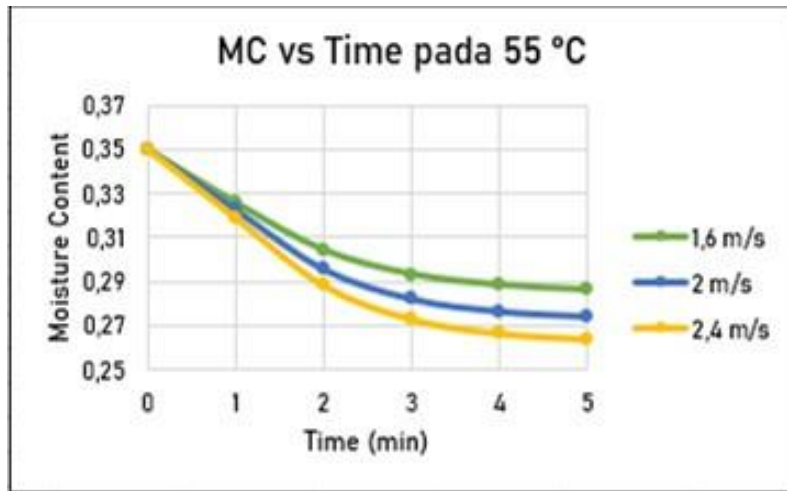
### 2.1.6 Nuha Sofianita (2021)

Penelitian ini dilakukan Nuha Sofianita berjudul “Studi Numerik Pengaruh Variasi Temperatur dan Kecepatan Fluidisasi *Coal Drying* terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara pada *Fluidized Bed Coal Dryer* dengan *Tube Heater* Tersusun *Staggered*” dengan metode numerik CFD menggunakan software Fluent 19.2. *Tube heater* yang tersusun *staggered* berada di dalam *fluidized bed coal dryer* dengan temperatur dijaga konstan yaitu  $75^\circ\text{C}$ . Simulasi dilakukan dengan variasi dua parameter, yaitu temperatur dan kecepatan. Temperatur yang divariasikan adalah  $45^\circ\text{C}$ ,  $55^\circ\text{C}$ , dan  $65^\circ\text{C}$ . Sedangkan kecepatan yang

divariasikan adalah 1.6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s. Pada penelitian ini akan diperoleh beberapa data *properties* hasil simulasi yang kemudian akan diolah melalui perhitungan manual dan hasil kualitatif berupa kontur.



**Gambar 2.17** Kontur (a) *Moisture Content*, (b) Kecepatan, dan (c) Temperatur



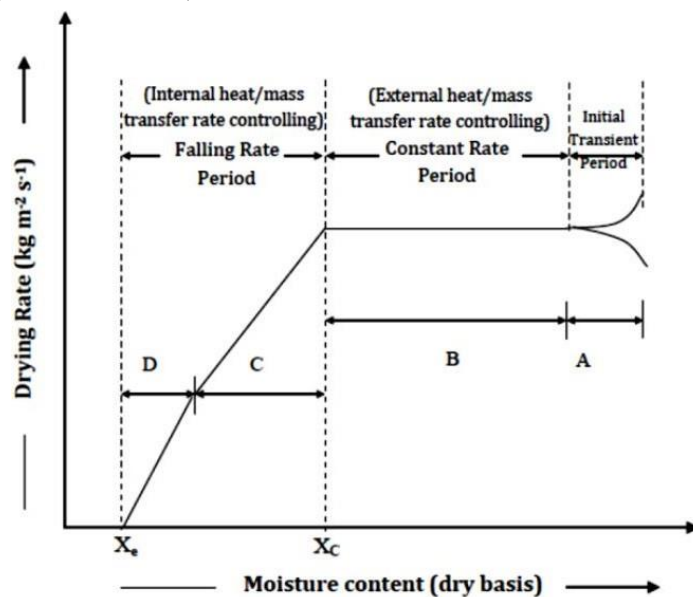
**Gambar 2.18** Grafik MC vs *Time Tube Heater Tersusun Staggered* dengan Variasi Kecepatan pada Temperatur 55°C

Dapat dilihat pada salah satu grafik bahwa terjadi pengurangan *moisture content* yang awalnya sebesar 0,35 baik pada variasi temperatur maupun kecepatan yang berlaku pada grafik lainnya. Untuk hasilnya, ada temperatur 45°C *moisture content* berubah menjadi 0,31455 pada kecepatan 1,6 m/s, 0,30817 pada kecepatan 2 m/s, dan 0,30251 pada kecepatan 2,4 m/s. Pada temperatur 55 °C, *moisture content* berubah menjadi 0,28601 pada kecepatan 1,6 m/s, 0,27422 pada kecepatan 2 m/s, dan 0,26376 pada kecepatan 2,4 m/s. Dan pada temperatur 65 °C, *moisture content* berubah menjadi 0,25012 pada kecepatan 1,6 m/s, 0,22867 pada kecepatan 2 m/s, dan 0,2115 pada kecepatan 2,4 m/s. Sehingga dapat disimpulkan, semakin tinggi temperatur dan kecepatan udara pengering maka akan semakin banyak *moisture content* yang diserap oleh udara dan laju pengeringan akan semakin cepat. Dengan adanya *tube heater* yang tersusun *staggered* mengakibatkan proses *heating* pada udara pengering dimana terjadi peningkatan temperatur udara sekitar *tube heater* disertai dengan peningkatan *humidity ratio* udara sekitar *tube heater*. (Sofianita,2021)

## 2.2 Pengeringan Batubara

Proses pengeringan dari batubara pada dasarnya adalah untuk mengurangi kadar air pada produk untuk meningkatkan nilai kalor batubara. Dalam proses pengeringan sendiri terdapat dua tahap. Proses yang pertama adalah pergerakan air dari dalam batubara menuju lapisan luar batubara. Hal ini terjadi akibat dari perbedaan temperatur batubara akibat pemanasan yang terjadi. Pada tahap selanjutnya air yang telah berpindah menuju permukaan batubara akan menguap dan tercampur ke udara pemanas, yang mengakibatkan nilai kandungan air pada udara pemanas akan meningkat. (Astagina, 2015)

Gambar 2.14 menunjukkan bentuk kurva laju pengeringan pada periode laju konstan awal dengan  $R = R_c = \text{konstan}$ . Periode laju konstan sepenuhnya dipengaruhi oleh laju perpindahan panas dan massa eksternal mulai dari lapisan film bebas air hingga permukaan yang dapat menguap. Periode pengeringan ini tidak dipengaruhi oleh jenis material yang dikeringkan. (Jangam, dkk, 2010)



**Gambar 2.19** 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–X<sub>0</sub> : Periode laju pengeringan menurun

a. Periode laju pengeringan naik

Sesaat setelah bahan menerima panas dari udara pengering yang panas, maka temperatur batubara akan naik hingga mencapai kesetimbangan dengan temperatur wet bulb udara (Tw<sub>b</sub>). Kurva akan naik (A–B), bila temperatur awal batubara lebih rendah daripada temperatur wet bulb udara pengering. Kurva akan turun (A'–B) bila temperatur awal batubara lebih tinggi daripada temperatur wet bulb udara pengering. Bila temperature awal batubara sama dengan Tw<sub>b</sub> udara pengering maka kurva periode ini tidak ada. (Astagina, 2015)

b. Periode laju pengeringan konstan

Pada periode ini (B–C) permukaan bahan jenuh dengan uap air, temperatur uap air pada permukaan sama dengan Tw<sub>b</sub> udara pengering. Selama proses ini berlangsung kecepatan aliran air dari dalam bahan sama dengan kecepatan air yang diuapkan. Proses ini



berakhir bila kadar air bebas bahan mencapai titik kritis (*critical moisture content*). Kadar air kritis adalah kadar air bebas terendah saat laju kecepatan air bebas ke permukaan sama dengan laju penguapan. Pada periode ini proses pengeringan bergantung pada faktor eksternal seperti laju aliran udara dan temperatur udara pengering. (Astagina, 2015)

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 pada batubara dan selanjutnya karena perbedaan konsentrasi antara dalam dan permukaan maka air tersebut akan bergerak ke permukaan. Jumlah cairan yang diuapkan pada periode ini relatif kecil dan waktu yang diperlukan relatif lama. (Astagina, 2015)

Metode pengeringan dapat dikelompokkan berdasarkan kriteria yang tertera di bawah ini.

**Tabel 2.2** Pengelompokkan Mesin Pengering

<b>Kriteria</b>	<b>Jenis</b>
<i>Modus Operasi</i>	1. Batch. Contohnya: <i>try and compartment dryer, through circulation dryer, vacuum rotary dryer, vacuum tray dryer</i> . 2. Kontinyu. Contohnya: <i>pneumatic dryer, tunnel dryer, rotary dryer, fluidized bed dryer, drum dryer, cylinder dryer, tray dryer, spray dryer</i> .
<i>Metode Perpindahan Panas</i>	1. Konduksi. Contohnya: <i>belt conveyor dryer, rotary dryer flash dryer, spray dryer, tray dryer, fluidized bed dryer</i> . 2. Konveksi. Contohnya: <i>drum dryer, vacuum tray dryer, steam jacket rotary dryer</i> . 3. Radiasi. Contohnya: <i>microwave</i> .
<i>Tekanan Operasi</i>	1. Vakum. Contohnya: <i>vacuum rotary dryer, vacuum tray dryer freeze dryer</i> . 2. Tekanan atmosfer. Contohnya: <i>rotary dryer, tunnel dryer, drum dryer, cylinder dryer, tray dryer, spray dryer</i> .
<i>Waktu Bahan dalam Mesin Pengering</i>	1. Singkat (< 1 menit). Contohnya: <i>flash dryer, spray dryer, drum dryer</i> . 2. Sedang (1-120 menit). Contohnya: <i>belt conveyor dryer, fluidized bed dryer, rotary dryer, tray dryer</i> . 3. Panjang (>120 menit). Contohnya: <i>Tray Dryer (Batch)</i> .

(Mujumdar dan Menon, 1995)

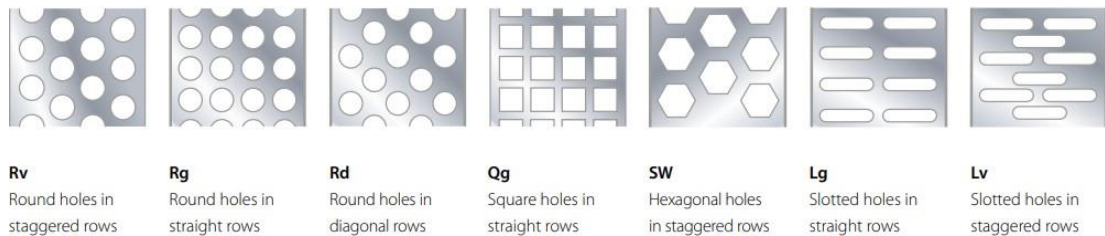
### 2.3 Perforated Plate

Secara umum, lembaran *perforated* plate dengan material metal dapat digunakan untuk berbagai macam fungsi, di antaranya sebagai pembatas ruang dengan AC dan penghalang atau sekat antar ruang, pembayang atau pelindung dari sinar matahari, atau panel tembus pandang pada dinding atau plafon, mereduksi suara dan bising, sebagai pelapis fasad, alat filter sistem, alat pendingin atau pemanas, elemen mesin, tempat duduk publik, dan lain-lain.

*Perforated* metal dapat dibedakan dalam beberapa macam jenis berdasarkan spesifikasinya, antara lain:

- Material: material yang tersedia biasanya berupa carbon steel, pregalvanized steel, aluminium, dan stainless steel. Material ini dapat dibedakan berdasarkan ukuran atau ketebalannya.
- Bentuk lubang: bundar, persegi, persegi panjang, segilima, dan bentuk alur.

#### Perforation patterns



**Gambar 2.20** Bentuk Lubang Perforasi pada *Perforated Plate*

- Pola lubang-lubang perforasi: *staggered* (distribusi perforasi dalam pola segitiga membentuk sudut 45° atau 60° ketika tiga lubang berdekatan disatukan dalam satu garis lurus) atau garis lurus; untuk bentuk alur, *side staggered* (distribusi perforasi dimana sisi dari pola perforated dapat membentuk segitiga) atau *end staggered* (distribusi perforasi dimana tepi dari pola perforated dapat membentuk segitiga).
- Margin: *end margins* (area yang tidak perforated ada pada bagian tepi atau sisi yang pendek dari lembaran) atau *side margins* (area yang tidak perforated ada pada bagian samping atau sisi yang panjang dari lembaran).

### 2.4 Prinsip Perpindahan Massa

Pada proses pengeringan menerapkan prinsip perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering yaitu seperti pembahasan berikut ini

#### 2.4.1 Perpindahan uap air dari dalam ke permukaan batubara

Perpindahan uap air dapat terjadi karena perbedaan konsentrasi yang mana konsentrasi air pada bagian dalam batubara lebih besar dibanding dengan konsentrasi pada bagian permukaan sehingga air akan bergerak dari dalam ke permukaan batubara. Pada prinsip ini persamaan yang digunakan ialah persamaan Fick untuk difusi satu dimensi dengan menganggap suatu lapisan tipis, Gerakan uap air dari material ke bagian permukaan. (Incopera, 2005)

$$N''_{wf} = -D_{AB} \cdot \left( \frac{\delta C_w}{\delta x} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

$$n''_{wf} = -D_{AB} \cdot \left( \frac{\delta \rho_w}{\delta x} \right) \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana:

- $N''_{wf}$  = Fluks molar uap air (kg.mol/s.m<sup>2</sup>)
- $n''_{wf}$  = Fluks massa uap air (kg/s.m<sup>2</sup>)
- $D_{AB}$  = Koefisien difusi binary dari material (m<sup>2</sup>/s)
- $\delta C_w / \delta x$  = Perbedaan konsentrasi uap air dalam arah x (kg.mol/m<sup>4</sup>)
- $\delta \rho_w / \delta x$  = Perbedaan rapat massa uap air dalam arah x (kg.mol/m<sup>4</sup>)

**2.4.2 Perpindahan uap air dari permukaan batubara ke udara pengering**

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

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

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

dimana:

- $h_m$  = koefisien konveksi perpindahan panas (m/s)
- $C_{A,s}$  = konsentrasi uap air di permukaan material (kgmol/m<sup>3</sup>)
- $C_A$  = konsentrasi uap air di medium pengering (kgmol/m<sup>3</sup>)
- $\rho_{A,s}$  = rapat massa uap air di permukaan batubara (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_A$  = rapat massa uap air di medium pengering (kg/m<sup>3</sup>)

(Incropera, 2005)

**2.5 Analogi Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa**

Analogi antara perpindahan panas dan perpindahan massa bisa digunakan secara langsung untuk menghubungkan antara dua koefisien konveksi yang saling simultan saat terjadi perpindahan panas dan perpindahan massa. Bilangan Nusselt adalah gradien temperatur tidak berdimensi pada permukaan, dirumuskan

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

Bilangan Sherwood merupakan gradien konsentrasi tidak berdimensi pada permukaan, dirumuskan

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

Bilangan Prandtl adalah perbandingan antara momentum dan difusivitas panas, dituliskan

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{v}{\alpha} \dots \dots \dots (2.7)$$

Bilangan Schmidt merupakan perbandingan antara momentum dan difusivitas massa, dirumuskan

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \dots \dots \dots (2.8)$$

$Nu$  dan  $Sh$  sebanding dengan  $Pr^n$  dan  $Sc^n$  (Incropera dan De Witt, 2002) dituliskan sebagai:

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

Kemudian dalam mengolah data pada bab IV, dibutuhkan nilai koefisien perpindahan massa ( $h_m$ ) yang didapatkan dari persamaan:

$$h_m = \frac{hx D_{AB} X_e^n}{k} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana  $L_e^n$  yang merupakan perbandingan antara *thermal diffusivities* dan *mass diffusivities*, seperti perumusan dibawah ini

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \dots \dots \dots (2.10)$$

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:

$$A n'' = h_m x (\rho_{H_2O_{cool}} - \rho_{H_2O_{inlet}}) \dots\dots\dots (2.11)$$

$$n_A = n'' \times A \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana:

$h$  = Heat transfer coefficient (W/m<sup>2</sup>K)

$h_m$  = Mass transfer coefficient (m/s)

$k$  = Thermal conductivity (W/mK)

$D_{AB}$  = Diffusivity (m<sup>2</sup>/s)

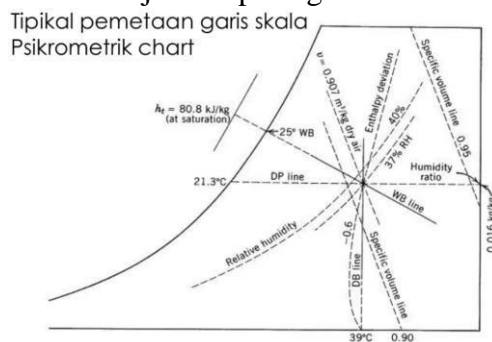
$C_p$  = Specific heat (J/kg.K)

$\alpha$  = Thermal diffusivity (m<sup>2</sup>/s)

(Incopera, 2005)

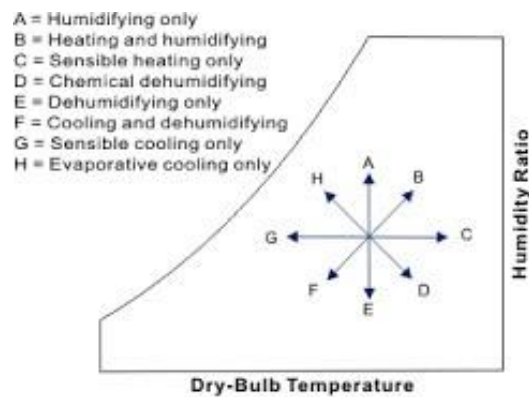
## 2.6 Prinsip Psikrometri

Psikrometri merupakan suatu ilmu yang mengkaji mengenai sifat-sifat campuran udara dan uap air yang memiliki peranan penting dalam menentukan sistem pengondisian udara, sebab sebenarnya udara pada atmosfer mengandung sejumlah uap air. Diagram psikrometrik merupakan hasil karya jenius peninggalan kakek moyang kita yang berhubungan dengan karakteristik udara. Dengan adanya chart ini maka perencanaan tata udara menjadi lebih sederhana, karena tidak perlu menggunakan hitungan matematis yang rumit. *Chart* psikrometrik merupakan tampilan secara grafikal sifat termodinamik udara antara lain suhu, kelembaban, enthalpi, kandungan uap air dan volume spesifik. Dalam chart ini dapat langsung diketahui hubungan antara berbagai parameter udara secara cepat dan persisi, baik yang berkaitan dengan sifat fisik udara maupun sifat thermiknya. (Putro, 2008, p.6). Berikut adalah diagram psikrometrik yang akan ditunjukkan pada gambar 2.8.



**Gambar 2.21** Pemetaan pada Psikrometrik Chart

Pada diagram psikometrik terdapat beberapa proses yang dialami oleh udara yaitu Proses pemanasan (*heating*), proses pendinginan (*cooling*), proses pelembaban (*humidifying*), proses penurunan kelembaban (*dehumidifying*), proses pemanasan dan pelembaban (*heating and humidifying*), proses pemanasan dan penurunan kelembaban (*Heating and dehumidifying*), proses pendinginan dan pelembaban (*cooling and humidifying*), proses pendinginan dan penurunan kelembaban (*cooling and dehumidifying*). Pada proses pengeringan batubara proses yang terjadi yaitu proses *Heating and dehumidifying* dan proses *cooling and humidifying* (Astagina,2015).



**Gambar 2.22** Proses Pada Psikometrik Chart

Ada beberapa istilah yang digunakan dalam psikometrik chart pada proses pengeringan batubara antara lain:

a. Kelembaban relatif (RH)

Kelembaban relatif adalah perbandingan antara fraksi molekul air (tekanan uap air) di dalam udara basah terhadap fraksi molekul air jenuh (tekanan jenuh uap air) pada temperature dry bulb dan tekanan yang sama. Dari hubungan untuk gas ideal, kelembaban relative dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\theta = \frac{P_{uap}}{P_s} \dots \dots \dots (2.13)$$

dimana:

$P_{uap}$  = tekanan uap air

$P_s$  = tekanan jenuh uap air pada temperature yang sama

b. Rasio Kelembaban

Rasio kelembaban adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Rasio kelembaban dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\omega_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{udara}} \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana:

$\omega_{H_2O}$  = rasio kelembaban H<sub>2</sub>O (kg/kg)

$m_{H_2O}$  = massa uap air (H<sub>2</sub>O) yang terkandung (kg H<sub>2</sub>O)

$m_{udara}$  = massa udara kering (kg udara kering)

c. Fraksi massa

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

$$Y_{H_2O} = \frac{kg_{H_2O}}{kg_{H_2O} + kg_x} \dots \dots \dots (2.15)$$

d. Massa H<sub>2</sub>O pada *inlet*

Pada proses pengeringan batubara, untuk mengetahui massa uap air yang terkandung dalam udara tersebut adalah

$$m_{H_2O, inlet} = massa\ udara_{inlet} \cdot Y_{H_2O} \dots \dots \dots (2.16)$$

e. Massa H<sub>2</sub>O pada *outlet*

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

$$m_{H_2O, outlet} = massa\ udara_{outlet} \cdot Y_{H_2O} \dots \dots \dots (2.17)$$

f. Massa H<sub>2</sub>O yang dibawa oleh udara pengering

Untuk mendapatkan banyaknya massa H<sub>2</sub>O yang dibawa oleh udara pengering dari batubara yang dilewatinya adalah:

$$\Delta m_{H_2O} = m_{H_2O, outlet} - m_{H_2O, inlet} \dots\dots\dots (2.18)$$

g. Massa H<sub>2</sub>O pada permukaan batubara awal

Dengan jumlah batubara yang ada maka massa air yang terkandung dalam batubara adalah

$$m_{H_2O, coal awal} = Y_{H_2O} \cdot \text{massa batubara} \dots\dots\dots (2.19)$$

h. Massa H<sub>2</sub>O pada permukaan batubara akhir

Jumlah kandungan H<sub>2</sub>O didalam batubara pada akhir proses dapat dihitung dengan menggunakan perumusan sebagai berikut

$$m_{H_2O, coal akhir} = m_{H_2O, coal awal} - \Delta m_{H_2O} \dots\dots\dots (2.20)$$

i. Waktu pengeringan

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

$$t = \frac{\Delta m_{H_2O}}{n_A} \dots\dots\dots (2.21)$$

### 2.7 Persamaan pada *Fluidized Bed*

*Fluidized bed* banyak digunakan dalam proses industri yang berbeda termasuk pengeringan, pendinginan, granulasi, pelapisan, dll. Mereka dapat digunakan untuk bahan yang peka panas dan tidak peka panas. Dalam industri batubara, unggun terfluidisasi digunakan dalam proses seperti pengeringan, gasifikasi, dan de-volatilisasi. Pengering bed terfluidisasi (FBD) berguna untuk mengeringkan bubuk, butiran, aglomerat, dan pelet dalam kisaran ukuran 50 hingga 5000 μm. Partikel di luar kisaran ukuran ini terlalu kecil atau terlalu besar untuk difluidisasi dan mungkin memerlukan gaya tambahan, yaitu getaran, untuk melikuidasi (Mak,2007).

Kecepatan minimum fluidisasi pada partikel kecepatan superfisial suplai udara tempat terjadinya fluidisasi sehingga pengelembungan atau spouting akan tercatat, lalu dapat diperoleh dengan menghitung bilangan Ar dengan persamaan 2.22 berikut.

$$Ar = \frac{\rho_g d_p^3 (\rho - \rho_g) g}{\mu^2} \dots\dots\dots (2.22)$$

Untuk menuliskan persamaan U<sub>mf</sub> bisa menggunakan metode dan beberapa asumsi dari *pressure loss equation of fluidized bed*. Wen dan Yu (1966) menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$Re_{mf} = \sqrt{33,7^2 + 0.0408 Ar} - 33.7 \dots\dots\dots (2.23)$$

Dan Re<sub>mf</sub> adalah Reynolds number pada kecepatan fluidisasi.

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g u_{mf} D_h}{\mu} \dots\dots\dots (2.24)$$

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

$$u_{mf} = \frac{Re_{p, mf} \mu}{\rho_g d_p} \dots\dots\dots (2.25)$$

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.

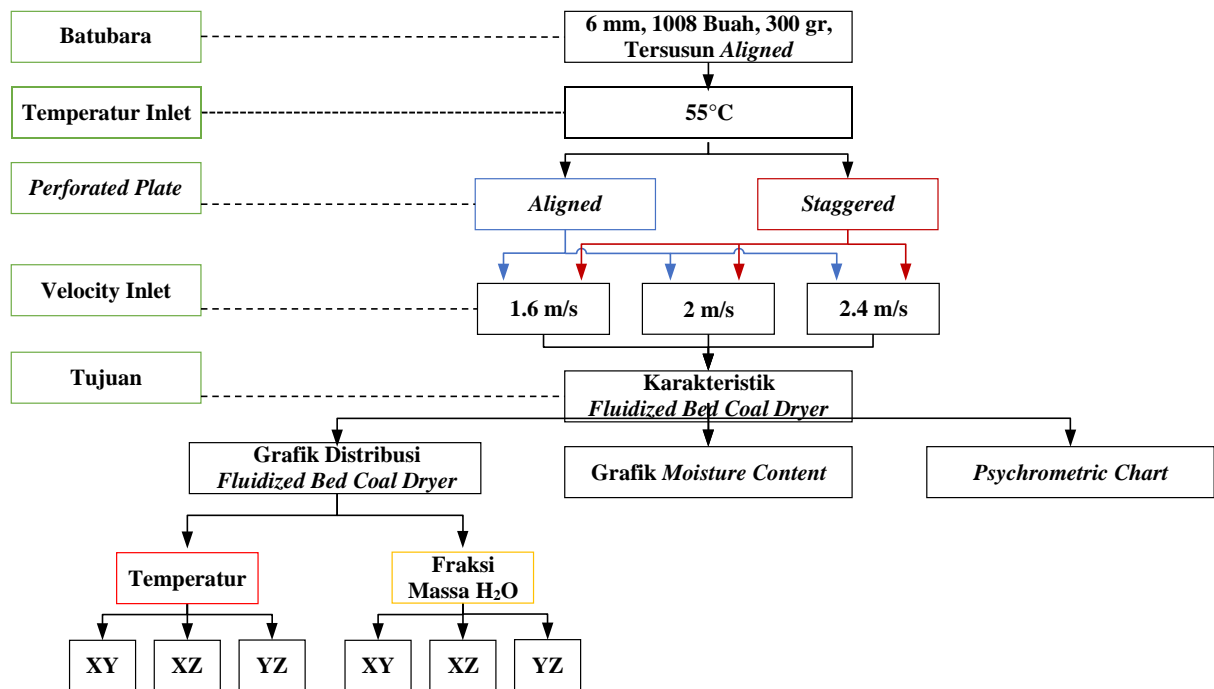
$$u_t = d_p \left( \frac{1,78 \times 10^{-2} [g(\rho_p - \rho_g)]}{\rho_g \mu} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (2.26)$$

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Model Pengeringan pada *Fluidized Bed Coal Dryer*

Pada penelitian ini, untuk mengetahui karakteristik pengeringan batubara yang dilakukan oleh *fluidized bed coal dryer* langkah awalnya adalah membuat pemodelan yang dapat mewakili proses alat tersebut. Pengeringan ini berada di dalam *chamber* yang sudah berisikan batubara, selanjutnya dihembuskan aliran udara panas melalui *inlet* yang terdapat juga *perforated plate* sebelum memasuki *chamber*. *Perforated plate* merupakan plat berlubang yang berguna sebagai jalur masuk udara panas yang dialirkan tadi. Penelitian kali ini menggunakan dua jenis *perforated plate* berdasarkan susunannya yaitu *staggered* dan *aligned*. Kemudian, udara yang telah dipanaskan masuk dengan kecepatan tertentu sampai terkena batubara, kecepatan yang digunakan harus dapat mengangkat semua batubara keatas oleh udara yang dinamakan kecepatan minimum fluidisasi.

Rangkumn dari seluruh pemodelan dari *fluidied bed coal dryer* disajikan dalam bentuk bagan berupa kerangka penelitian sebagai berikut:



**Gambar 3.1** Kerangka Penelitian

Berdasarkan gambar 3.1 spesifikasi batubara yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan ukuran 6 mm, dengan jumlahnya sebanyak 1008 dan massanya senilai 300 gram. Susunan dari batubara diasumsikan *aligned* yang lurus sejajar dengan lubang ketika *perforated plate aligned*. Kemudian, untuk bagian *inlet* maka inputkan temperatur sebesar 55°C dan udara tersebut mengalir melalui plat berlubang dengan susunan berbeda yaitu *aligned* dan *staggered*. Selain memasukkan nilai temperature, diperlukan juga berapa kecepatan udara masuk yang pada penelitian ini divariasikan sebanyak tiga nilai yaitu 1.6, 2, serta 2.4 m/s. Dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik bed pengering batubara, pertama deengan mengetahui bagaimana distribusi temperatur dan fraksi massa H<sub>2</sub>O pada *chamber*, ditinjau dari beberapa sumbu yang berbeda ada XY, YZ, dan XZ dilakukan dengan membuat titik pada posisi tertentu

maka diketahui bagaimana bandingan dari perbedaan posisi itu, untuk grafik distribusi adalah data yang didapat secara kualitatif. Untuk data kuantitatif kita coba dengan menggunakan nilai-nilai *output* yang diperlukan jadi diperoleh *moisture content* akhir. Dan untuk yang terakhir mengetahui bagaimana karakteristik *fluidized bed coal dryer* melalui grafik psikrometrik, dibutuhkan dua nilai untuk menghasilkan sebuah titik yang tergambar di grafik tersebut yakni ada *relative humidity* dan temperatur *dry bulb*, sehingga didapatkan nilai humidity ratio dan sifatnya berdasarkan grafik psikrometrik.

### 3.2 Tahapan Penelitian

Proses pengeringan batubara penelitian ini pada *fluidized bed coal dryer* dilakukan secara numerik berbasis komputasi dengan metode CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Ada tiga tahap yang perlu dilaksanakan yakni *pre-processing*, *processing*, *solving*, dan *post-processing*. Simulasi numerik ini dapat dikerjakan dengan bantuan *software* pendukung, dimana disini menggunakan Gambit 2.4.6 dan ANSYS Fluent 19.2.

#### 3.2.1 Tahapan Pre-Processing

Tahapan ini dilakukan persiapan sebelum menuju ke proses dari CFD. Beberapa tahapan yang dilakukan saat *pre-processing* pertama pembuatan geometri dengan data yang sudah diperoleh, lalu penentuan domain, kemudian tahapan *meshing*, serta yang terakhir menentukan parameter yang akan digunakan.

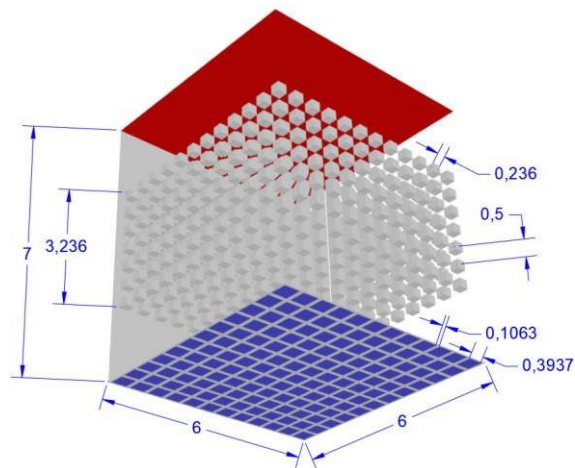
##### 3.2.1.1 Domain Pemodelan pada Chamber Pengering Batubara

Pembentukan geometri yang dikerjakan pada penelitian ini adalah *chamber* pengering batubara dengan susunan batubara yang sama di susunan *perforated plate* secara *staggered* dan *aligned*. Referensi geometri *chamber* pengering batubara yang dibuat adalah mengikuti eksperimen yang dilakukan oleh **Edward K. Levy dkk (2006)** yang dimodifikasi menjadi simulasi 3D. Batubara berada di dalam *chamber* yang dialiri oleh fluida berupa udara panas. Pembuatan geometri diasumsikan segiempat agar membantu dalam pemodelan dan pembuatan *meshing* diantaranya ada batubara, *bed dryer*, serta *perforated plate*. Juga sesuai dengan kapasitas dan volume dari ruang pengering dengan massa batubara 300 gram maka jarak antar batubara dapat disesuaikan, mengikuti volume dari *chamber* serta batubara tersebut.

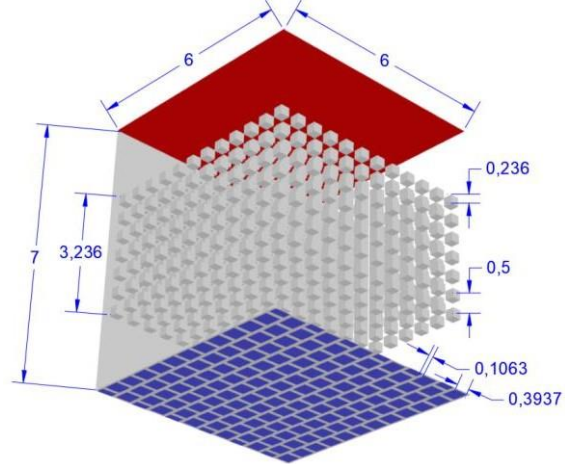
**Tabel 3.1** Geometri 3D *Chamber* Pengering Batubara

Parameter	Ukuran
Panjang × lebar bed	6×6 inch
Tinggi bed	7 inch
Panjang × lebar batubara	0,236×0,236 inch
Tinggi batubara	0,236 inch
Pitch batubara dan lubang plat	0,5 inch
Jumlah batubara	1008 buah
Panjang × lebar lubang pada plat	0,3937×0,3937 inch
Jumlah lubang pada plat <i>aligned</i>	10×10 mm = 144 buah
Jumlah lubang pada plat <i>staggered</i>	10×10 mm = 138 buah 10× 5 mm = 12 buah





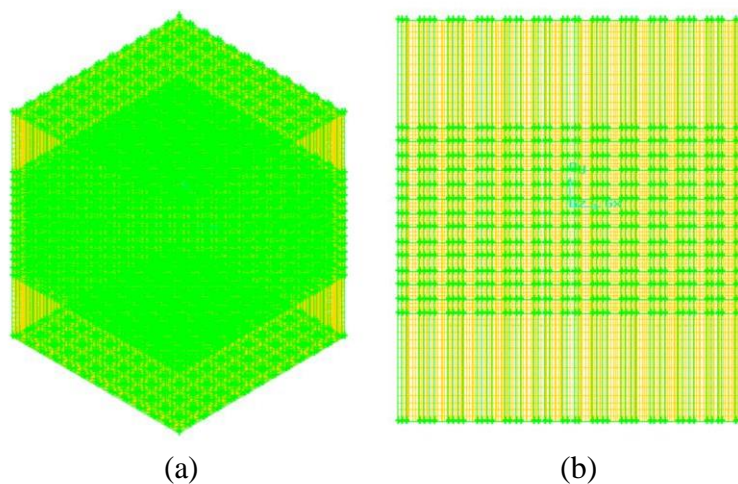
**Gambar 3.2** Geometri 3D *Chamber* Pengering Batubara dengan *Perforated Plate* Tersusun *Aligned*

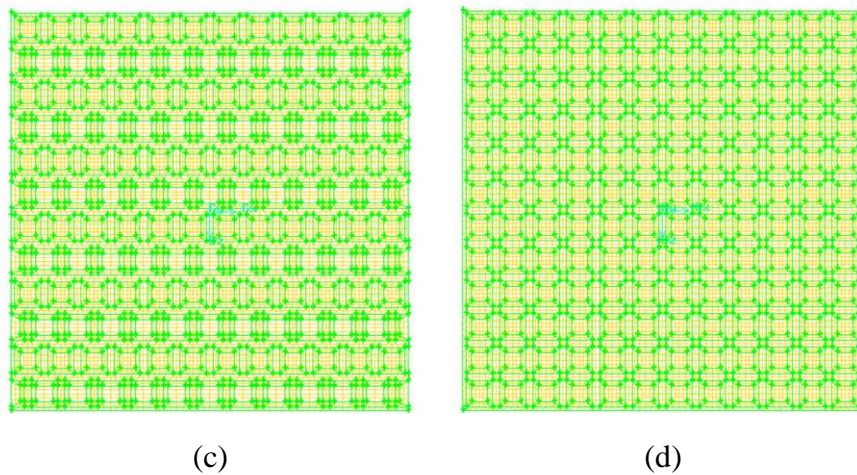


**Gambar 3.3** Geometri 3D *Chamber* Pengering Batubara dengan *Perforated Plate* Tersusun *Staggered*

### 3.2.1.2 Meshing pada Gambit 2.4.6

Setelah pemodelan geometri maka garis, bidang, maupun volume yang telah dibuat kemudian dibagi-bagi menjadi sel yang lebih kecil (*meshing*). Proses *meshing* penelitian ini menggunakan *software* yang sama dengan pembuatan geometri yaitu Gambit 2.4.6 dimana hasilnya dapat dilihat pada gambar 3.3 sebagai berikut.

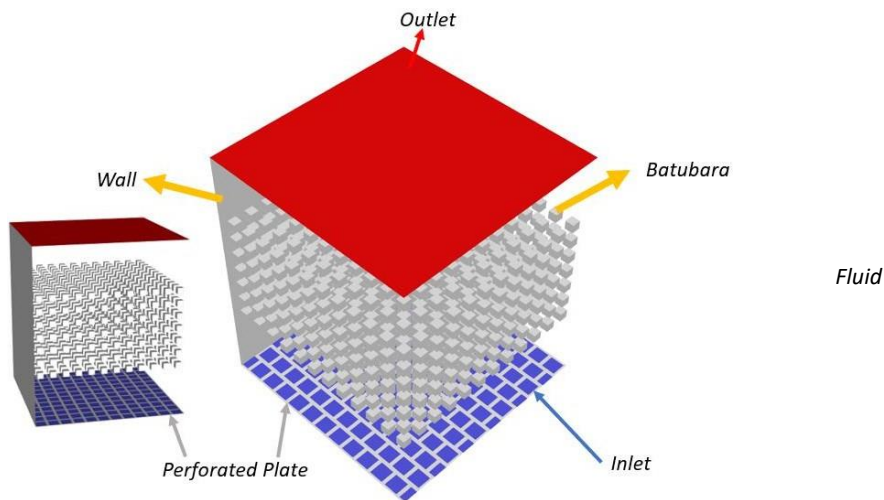




**Gambar 3.4** Meshing Chamber Pengering Batubara (a)Tampak Isometrik, (b)Tampak Samping (c)Perforated Plate Tersusun Staggered dan (d)Aligned

### 3.2.1.3 Define Zones pada Gambit 2.4.6

Tahapan pendefinisian zona dibutuhkan dalam menentukan *boundary conditions* agar dapat dilakukan. Tahapan ini diproses setelah melakukan *meshing* menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6. *Define zones* dapat digambarkan seperti pada gambar 3.4 berikut ini.



**Gambar 3.5** Define Zones Chamber Pengering Batubara

Selanjutnya, ketika tahap *pre-processing* siap, dilakukan perubahan format berkas yaitu dengan mengekspor ke bentuk \*.msh agar bisa dibaca saat memasuki *software* ANSYS Fluent 19.2.

## 3.2.2 Tahapan Processing

Tahapan *processing* dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS Fluent 19.2 dengan perincian pengaturannya dapat dilihat berdasarkan sub-tahapan berikut.

### 3.2.2.1 Solver

Pertama membuka ANSYS Workbench 19.2, lalu dilanjutkan mengimpor berkas *mesh* yang telah dibuat pada Fluent, ketika mengklik pilihan *setup* pada Fluent maka muncul

beberapa pilihan, gunakan *solver* 3D dengan pilihan keakuratan ganda (*double precision*) dengan mencentang pada kotak yang tersedia, karena pada penelitian ini simulasi dilakukan secara 3D. Dan pada pemilihan *processing* menggunakan *parallel* dengan menambahkan empat proses serta satu GPGPUs per *machine*.

Setelah masuk ke Fluent, menuju *general setup* dengan mengatur skala geometri sesuai dengan Gambit yang dibuat juga menambahkan percepatan gravitasi senilai  $-9.81 \text{ m/s}^2$  pada sumbu *y*. Selanjutnya untuk pengaturan *solver* adalah pada tabel 3.2 sebagai berikut ini.

**Tabel 3.2 Solver ANSYS Fluent 19.2**

Solver	Pilihan
Type	Pressure Based
Velocity Formulation	Absolute
Time	Steady

### 3.2.2.2 Models

Berdasarkan data referensi yang berasal dari jurnal menurut Nuha Sofianita (2021), tipe *models* yang digunakan ditunjukkan tabel 3.3, dan pengaturan *models* yang lain diatur sebagai *default*. Untuk menyelesaikan persoalan perpindahan panas maka model energi diaktifkan. Untuk transisi menggunakan menggunakan model Realizable  $k-\epsilon$ , serta untuk memodelkan perpindahan massa maka *species transport* diaktifkan juga dimana permukaan batubara mengandung fraksi massa  $\text{H}_2\text{O}$ .

**Tabel 3.3 Models ANSYS Fluent 19.2**

Models	Pilihan
Energy	On
Viscous	Model Realizable $k-\epsilon$ , Scalable Wall Functions (Viscous Heating)
Species	Species Transport (Diffusion Energy Source, Thermal Diffusion)

### 3.2.2.3 Boundary Condition

*Boundary condition* merupakan pengondisian dari masing-masing elemen yang telah dibuat di Gambit. Pada Fluent kita mengecek lagi batas-batas tersebut diantaranya *inlet* menggunakan *velocity inlet*. Untuk *wall* digunakan pada batubara dan batas *chamber*, serta bagian bawah yakni *perforated plate* yang berada diantara *inlet*. Sedangkan untuk *outlet* memakai jenis *outflow* dimana fluida yang ada akan mengalir tanpa Batasan, contohnya temperature, tekanan, dan *backflow*.

**Tabel 3.4 Boundary Conditions ANSYS Fluent 19.2**

Parameter	Keterangan
Inlet	Tipe : Velocity inlet Temperatur : $55^\circ\text{C}$ Fraksi massa $\text{H}_2\text{O}$ : 0,01614 Kecepatan : 1,6 m/s, 2 m/s, 2,4 m/s
Perforated plate	Tipe : Wall Temperatur : $27^\circ\text{C}$
Coal	Tipe : Wall Temperatur : $27^\circ\text{C}$

	Fraksi massa H <sub>2</sub> O : 0,35
<i>Chamber wall</i>	Tipe : <i>Wall</i> Temperatur : 27 °C
<i>Outlet</i>	Tipe : <i>Outflow</i>

Udara yang digunakan ketika melewati *drying chamber* disesuaikan dengan kondisi udara di Indonesia dengan temperatur 27 °C, *relative humidity* 73%, dan *humidity ratio* 0,0164 kg water/kg dry air yang merupakan udara standar.

Data yang dipaparkan pada tabel 3.4 berdasarkan jurnal milik Edward K. Levy dkk (2006) dimana temperatur *fluidized bed coal dryer* adalah 38-66°C, maka temperatur yang digunakan adalah 55°C. Proses pengeringan berakibat pada penguapan kandungan air dan *volatile matter*. *Volatile matter* yaitu komponen batubara yang memiliki nilai kalor yang tidak diinginkan penguapannya, dapat diketahui dari berdasarkan karakteristik komponen massa pembentuk batubara. Pada ASTM D-7348 batubara memiliki karakteristik yang hampir sama yaitu pada temperatur 150°C penguapan kandungan air batubara sudah selesai sedangkan *volatile matter* belum mulai menguap.

Untuk mengetahui kecepatan minimum fluidisasi agar batubara dapat terangkat ketika beda di dalam *chamber* pengering akan didapatkan sesuai dengan perhitungan berikut ini.

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

$$Ar = \frac{1,144 \frac{kg}{m^3} \cdot (0,006)m^3 \cdot (1400 - 1,144) \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{(1,854 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s})^2}$$

$$Ar = 9,855 \times 10^6$$

Telah diperoleh bilangan archimedes, langkah selanjutnya adalah menghitung bilangan Reynold.

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

$$Re_{mf} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408(9,855 \times 10^6)} - 33,7$$

$$Re_{mf} = 601,296$$

Setelah itu, gunakan persamaan bilangan Reynold berikut untuk mencari kecepatan minimum fluidisasi.

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

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

$$u_{mf} = \frac{601,296 \cdot (1,854 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s})}{1,444 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,006 m}$$

$$u_{mf} = 1,6 \text{ m/s}$$

Selain kecepatan minimum, diperlukan juga nilai keceotan maksimum sebagai batas agar batubara tetap berada di dalam *chamber* pengering.

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

$$u_t = \frac{1,78 \cdot 10^{-2} \left[ 9,81 \frac{m}{s^2} - (1400 - 1,144) \frac{kg}{m^3} \right]}{1,144 m^3 \times 1,854 \times 10^{-5} m \cdot s} = 0,006m$$

$$u_t = 32 \text{ m/s}$$

Kemudian mencari fraksi massa H<sub>2</sub>O pada *inlet* menggunakan persamaan 2.14 yaitu *humidity ratio*.

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

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

Dilanjutkan dengan substitusi persamaan diatas dengan persamaan 2.15 dimana asumsi udara masuk adalah senilai 0,3 kg.

$$mf_{H_2O\ udara} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{dry\ air}}$$

$$mf_{H_2O\ udara} = \frac{\omega \times m_{dry\ air}}{(\omega \times m_{dry\ air}) + m_{dry\ air}}$$

$$mf_{H_2O\ udara} = \frac{0,0164 \times 2,15 \text{ kg}}{(0,0164 \times 2,15 \text{ kg}) + 2,15 \text{ kg}}$$

$$mf_{H_2O\ udara} = 0,01614$$

Untuk mencari *moisture content* dari batubara maka digunakan persamaan berikut.

$$\%MC = \frac{m_{H_2O}}{m_{sampel}} \times 100\%$$

untuk mendapatkan fraksi massa H<sub>2</sub>O pada dinding batubara dapat menggunakan persamaan berikut.

$$mf_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_x}$$

$m_{sampel} = m_{H_2O} + m_x$  adalah berat keseluruhan batubara, didapatkan kandungan fraksi massa sama dengan nilai *moisture content*, yaitu 0,35 atau 35%.

### 3.2.2.4 Solution Methods

*Solution methods* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah.

**Tabel 3.5** *Solution Methods* Fluent 19.2

Parameter	Keterangan	
<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>
--	---------------	----------------------------

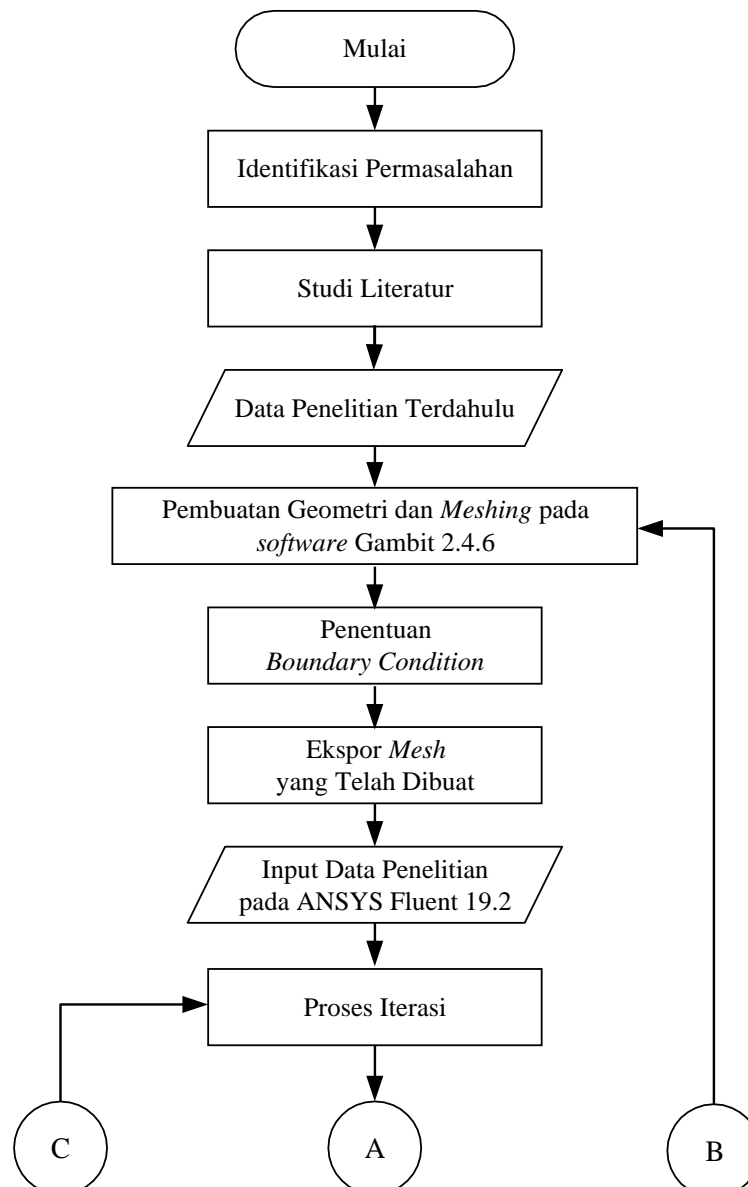
	<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>Second Order Upwind</i>
	<i>Gradient</i>	<i>Second Order Upwind</i>

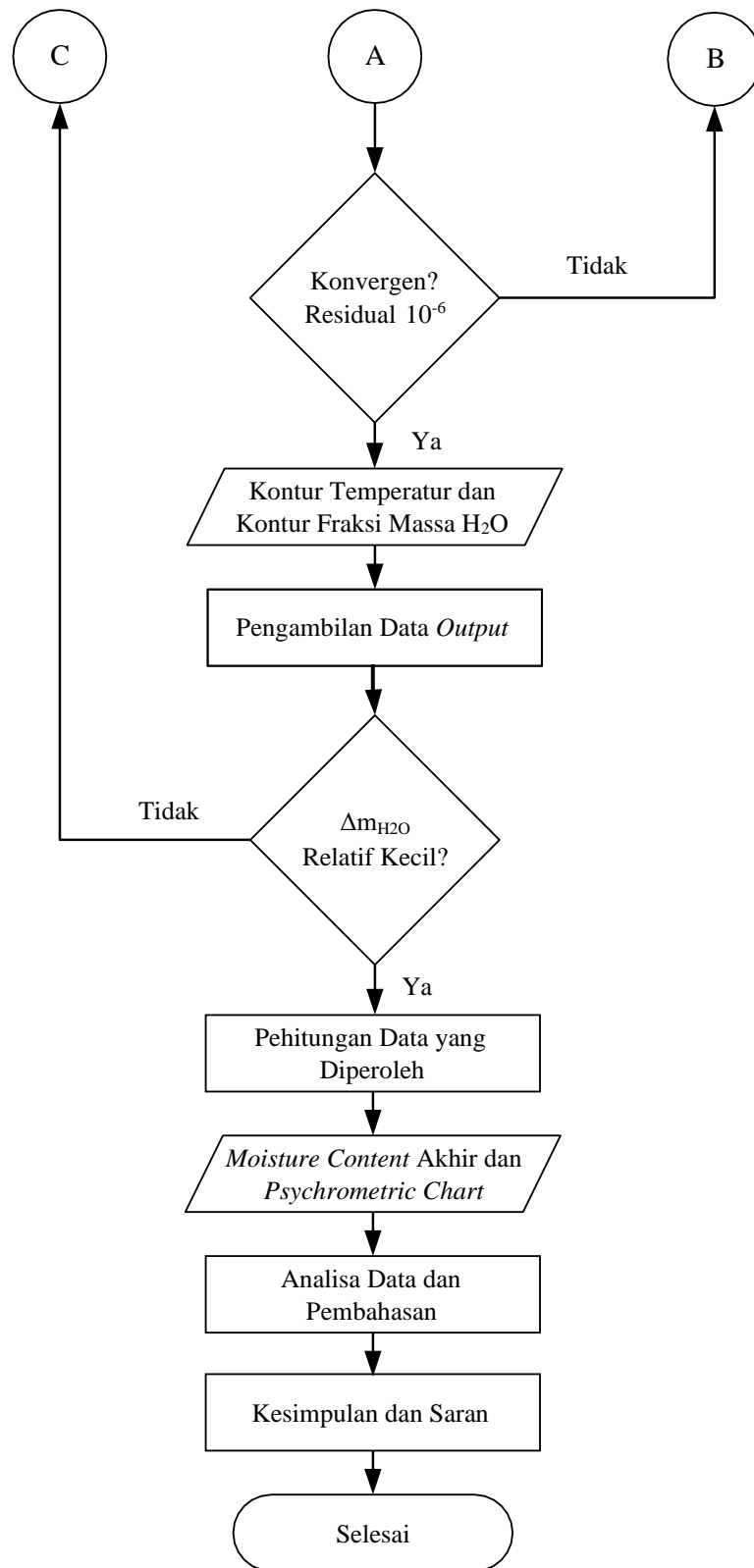
### 3.2.3 Tahapan Post-Processing

Tahapan akhir ini didapatkan data kualitatif diantaranya kontur temperature serta kontur fraksi massa dalam *chamber* pengering batubara dengan *perforated plate* yang tersusun *staggered* maupun *aligned*. Data kualitatif yang telah didapatkan langsung dianalisa untuk melihat karakteristik pengeringannya.

Sedangkan untuk data kuantitatif diperoleh dengan melakukan *report file* setelah dilakukan simulasi sampai kovergen. Pada penelitian ini, didapatkan data berupa temperatur (T), koefisien perpindahan panas rerata (h), fraksi massa H<sub>2</sub>O rata-rata (mf), massa jenis (ρ) dan panas spesifik (C<sub>p</sub>). Data yang tertera sebelumnya, kemudian diolah dengan *software* Microsoft Excel untuk menghitung laju pengeringan produk serta perubahan *moisture content* terhadap waktu.

### 3.3 Flowchart Penelitian

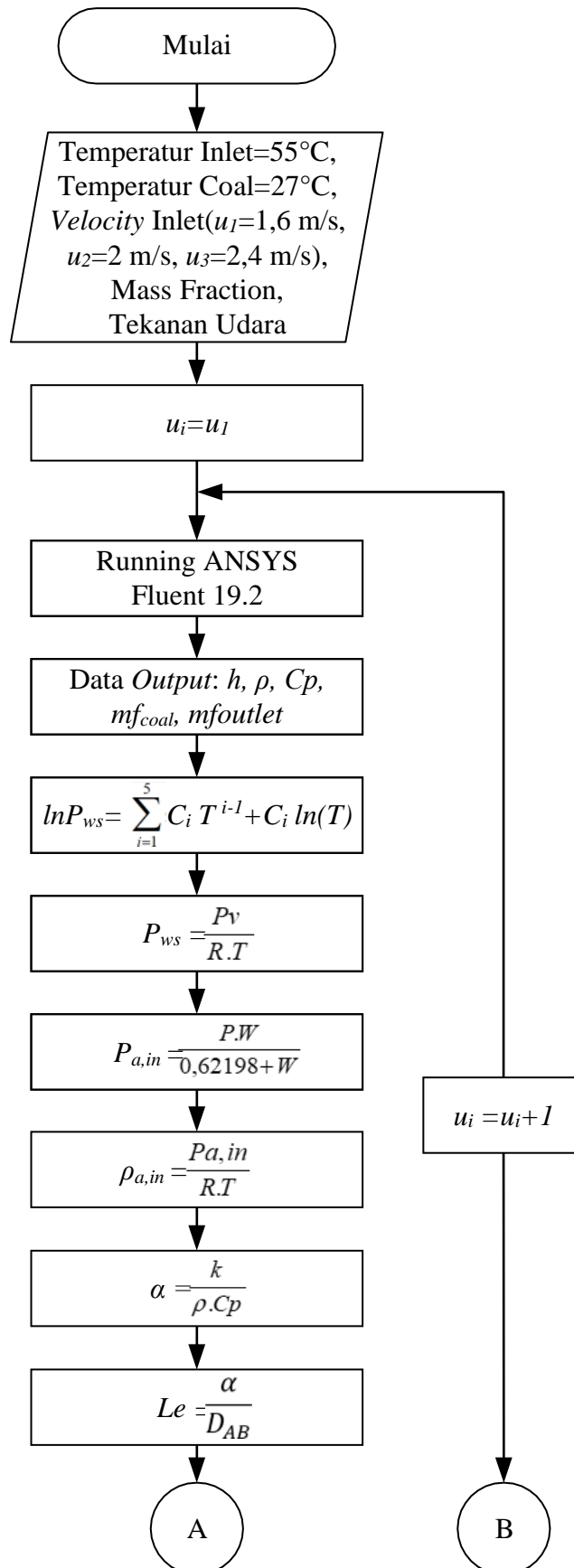


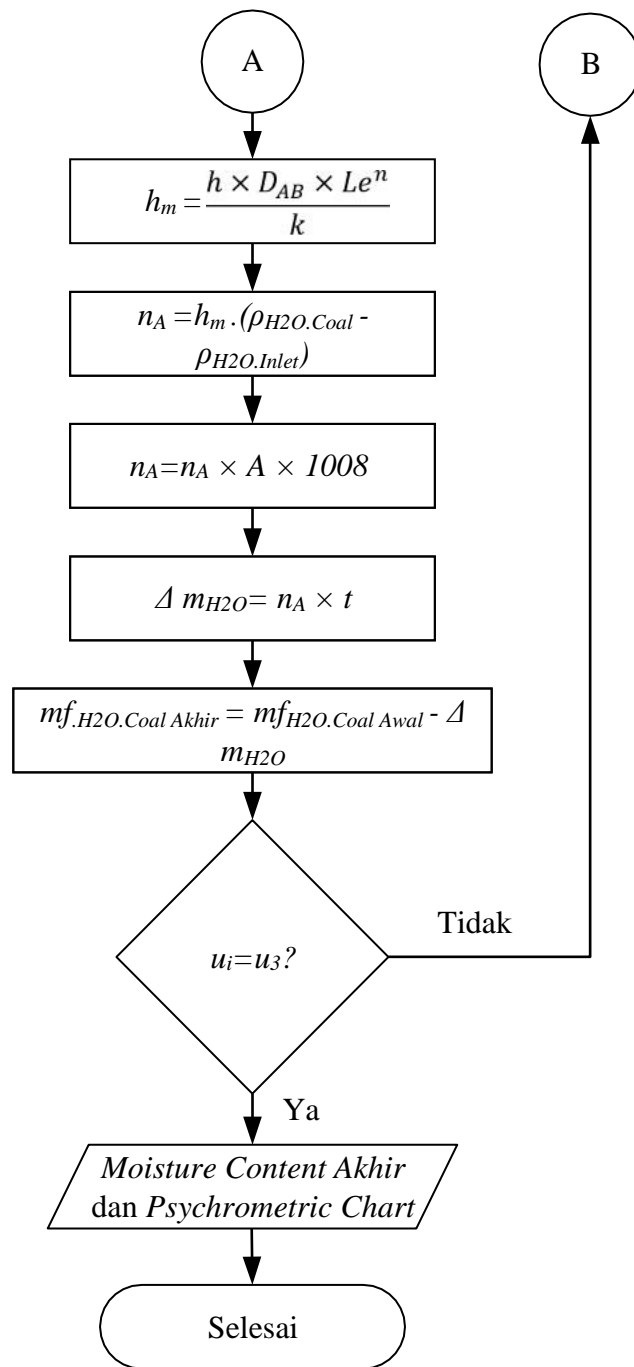


**Gambar 3.6** Flowchart Penelitian



### 3.4 Flowchart Perhitungan





Gambar 3.7 Flowchart Perhitungan

### 3.5 Rancangan Kegiatan Penelitian

Tabel 3.5 Jadwal Kegiatan

No.	Nama Kegiatan	Maret	April	Mei	Juni	Juli
1.	Studi Pustaka					
2.	Konsultasi kepada Pembimbing					

3.	Pembuatan Geometri																				
No.	Nama Kegiatan	<b>Maret</b>			<b>April</b>			<b>Mei</b>			<b>Juni</b>			<b>Juli</b>							
4.	Pembuatan Meshing																				
5.	Simulasi																				
6.	Pelaporan Kemajuan																				
7.	Menyusun Proposal Tugas Akhir																				
8.	Mengikuti Seminar																				
9.	Penyusunan Laporan Tugas Akhir																				
10.	Mengikuti Sidang Tugas Akhir																				

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Penelitian

Dalam melakukan pengolahan data yang diperoleh dari hasil simulasi, maka data tersebut diproses berkelanjutan dengan melakukan perhitungan secara numerik melalui *software* Fluent 19.2 (pada lampiran Tabel 2).

### 4.2 Contoh Perhitungan

Pada *software* Fluent 19.2 dilakukan simulasi proses pengeringan dengan variasi temperatur *air heater* 55 °C serta kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 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. Berikut adalah data yang digunakan dalam proses perhitungan selanjutnya.

**Tabel 4.1** Data Perhitungan

<i>Properties</i>	<b>Nilai</b>
Temperatur <i>inlet</i>	55°C
Kecepatan <i>inlet</i>	2 m/s
Fraksi massa H <sub>2</sub> O <i>inlet</i>	0,01614
<i>Humidity ratio inlet</i>	0,0164
Temperatur batubara	27°C
<i>Moisture content</i> batubara	0,35
Massa Batubara	0,3 kg
Massa udara pengering	2 kg
Tekanan <i>drying chamber</i>	101325
R <sub>a</sub>	287 J/kg.K
R <sub>s</sub>	461,5 J/kg.K

#### 4.2.1 Perhitungan Densitas H<sub>2</sub>O pada Permukaan Batubara

a. Tekanan parsial H<sub>2</sub>O pada permukaan batubara

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

Diketahui:

$$C_0 = -5,8002206 \times 10^3$$

$$C_1 = 1,3914993$$

$$C_2 = -4,8640239 \times 10^{-2}$$

$$C_3 = 4,1764768 \times 10^{-5}$$

$$C_4 = -1,4452093 \times 10^{-8}$$

$$C_5 = 0$$

$$C_6 = 6,5459673$$

Dengan temperatur permukaan batubara 27 °C maka didapatkan:

$$\ln(R_{ws}) = 8,1707$$

$$P_{ws} = \exp(8,1707)$$

$$= 3536,013 \text{ Pa}$$

b. Tekanan uap air

$$P_w = \phi \times P_{ws}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 \times 3536,013 \\
 &= 3536,013 \text{ Pa} \\
 \text{c. Densitas H}_2\text{O pada permukaan batubara}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{H_2O,coal} &= \frac{P_w}{R \times T} \\
 &= \frac{3536,013 \text{ Pa}}{461,5 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times 300 \text{ K}} \\
 &= 0,02554 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

#### 4.2.2 Perhitungan Densitas H<sub>2</sub>O pada Udara Inlet

$$\begin{aligned}
 \text{a. Tekanan udara inlet} \\
 P_{w,inlet} &= \frac{P \times \omega_{inlet}}{R_a} \\
 &= \frac{101325 \times 0,0164}{(0,62198 + 0,0164)} \\
 &= 2603,0421 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b. Densitas H}_2\text{O pada udara inlet} \\
 \rho_{H_2O,inlet} &= \frac{P_{w,inlet}}{R \times T} \\
 &= \frac{2603,0421 \text{ Pa}}{461,5 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times 328 \text{ K}} \\
 &= 0,017196 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

#### 4.2.3 Perhitungan setelah Running Fluent

Setelah melakukan proses iterasi *software* Fluent 19.2 dengan *boundary condition* yang sudah ditentukan pada Bab III, didapatkan data-data sebagai berikut:

**Tabel 4.2** Data dari Fluent 19.2

Properties	Nilai
Koefisien konveksi	83,245 W/m <sup>2</sup> .K
Konduktivitas termal	0,0454 W/m.K
Densitas ( $\rho_{coal}$ )	1,0174 kg/m <sup>3</sup>
Specific heat ( $c_{p,coal}$ )	1110,4492 J/kg.K
Binary mass diffusivity ( $D_{AB}$ )	2,88 x 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
Fraksi massa ( $mf_{H_2O,outlet}$ )	0,01832

Dari data-data tersebut dilakukan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{a. Thermal diffusivity} \\
 \alpha &= \frac{k}{\rho \times c_p} \\
 &= \frac{0,0454 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{1,0174 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1110,4492 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} \\
 &= 4,019 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

b. Lewis number (Le)

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

$$= \frac{4,019 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}}{2,88 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}}$$

$$= 1,3953172$$

c. Koefisien perpindahan massa secara konveksi ( $h_m$ )

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

$$= \frac{83,245 \text{ W/k} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}{2,88 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \times 1,3953172^1 / 3}$$

$$= \frac{83,245 \text{ W/k} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}{k}$$

$$= 0,0589436 \text{ m} / \text{s}$$

d. Laju perpindahan massa ( $n_A$ )

$$n_A = h_m \times A \times 1008 \times (\rho_{H_2O, \text{coal}} - \rho_{H_2O, \text{inlet}})$$

$$= 0,0589436 \text{ m} / \text{s} \times 6^3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \times 1008 \times (0,02554 - 0,017196) \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$= 1,1070 \times 10^{-4} \text{ kg} / \text{s}$$

e. Massa uap air batubara yang berpindah

Dengan interval waktu pengeringan selama 1 menit, maka:

$$m_{H_2O} = n_A \times t$$

$$= 1,1070 \times 10^{-4} \text{ kg} / \text{s} \times 60 \text{ s}$$

$$= 6,4248 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

f. Moisture content akhir

$$\Delta m_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{batubara}}}$$

$$= \frac{6,4248 \times 10^{-3} \text{ kg}}{0,3 \text{ kg}}$$

$$= 0,021416$$

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

$$= 0,35 \text{ kg} - 0,021416 \text{ kg}$$

$$= 0,32858 \text{ kg}$$

#### 4.2.4 Perhitungan Validasi

Untuk memvalidasi hasil dari perhitungan anual dilakukan perbandingan dengan nilai dari grafik psikrometrik antara *inlet* dan *outlet*, lalu dicari error antara hasil perhitungan dan *psychrometric chart* dengan cara sebagai berikut:

**Tabel 4.3** Data untuk Perhitungan Validasi

Properties	Nilai
Humidity ratio outlet	0,019421 kg H <sub>2</sub> O/kg dry air
Humidity ratio inlet	0,0164 kg H <sub>2</sub> O/kg dry air
Massa dry air	2,15 kg
Massa batubara	0,3 kg
$\Delta m_{H_2O}$ perhitungan	0,02142

Dari data-data tersebut dilakukan perhitungan seperti berikut ini:

a Massa uap air yang diterima udara

$$\omega_{\text{inlet}} = 0,01953 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg dry air}$$

$$\omega_{\text{outlet}} = 0,0164 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg dry air}$$

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \omega_{outlet} - \omega_{inlet} \\ &= 0,01953 - 0,0164 \\ &= 0,00313\end{aligned}$$

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

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

$$m_{H_2O} = 0,00313\text{ kgH}_2\text{O/kgdryair} \times 2,15\text{ kg}$$

$$m_{H_2O} = 0,006495\text{ kg}$$

$$m_{H_2O} = 6,7295\text{ gram}$$

b. Massa uap air yang dilepas udara

$$\Delta m_{H_2O} = 0,02142$$

$$m_{H_2O} = \Delta m_{H_2O} \times m_{batubara}$$

$$= 0,02142 \times 0,3\text{ kg}$$

$$= 0,06426\text{ kg}$$

$$= 6,426\text{ gram}$$

c. Balance Massa

$$m_{H_2O}\text{ yang diterima udara pengering} = m_{H_2O}\text{ yang dilepas batubara}$$

$$6,7295\text{ gram} = 6,426\text{ gram}$$

d. Error Massa

$$\%error = \left| \frac{m_{H_2O}\text{ yang diterima} - m_{H_2O}\text{ yang dilepas}}{m_{H_2O}\text{ yang diterima}} \right| \times 100\%$$

$$\%error = \left| \frac{6,4260 - 6,7295}{6,4260} \right| \times 100\% = 4,51\%$$

**Tabel 4.4** Tabel Validasi *Psychrometric Chart* dengan Perhitungan

Susunan Perforated Plate	Kecepatan Fluidisasi	mH <sub>2</sub> O diterima	mH <sub>2</sub> O dilepas	Error
	m/s	gram	gram	%
Aligned	1,6	5,7835	5,5530	3,99
	2	6,7295	6,4260	4,51
	2,4	7,1358	7,2870	2,12
Staggered	1,6	5,6911	5,4090	4,96
	2	6,2887	6,3390	0,80
	2,4	7,0241	7,2060	2,59

e. Mencari h perhitungan

$$Re = \frac{\rho_g u_{mf} D_h}{\mu}$$

$$= \frac{1,444 \frac{kg}{m^3} \times 2\text{ m/s} \times 0,01524\text{ m}}{1,854 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 2373,95$$

$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,3}$$

$$Nu = 0,023 \times 1899,16^{0,8} \times 1,3981^{0,3}$$

$$Nu = 12,7575$$

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

$$h = \frac{12,7575 \times 0,0454 \text{ W/m K}}{0,006 \text{ m}}$$

$$h = 82,7418 \text{ W/m}^2\text{K}$$

f. Error koefisien perpindahan panas

$$\%error = \left| \frac{h \text{ simulasi} - h \text{ perhitungan}}{h \text{ simulasi}} \right| \times 100\%$$

$$\%error = \left| \frac{83,245024 - 82,7418}{82,7418} \right| \times 100\% = 0,6\%$$

**Tabel 4.5** Tabel Validasi h Simulasi dan h Perhitungan

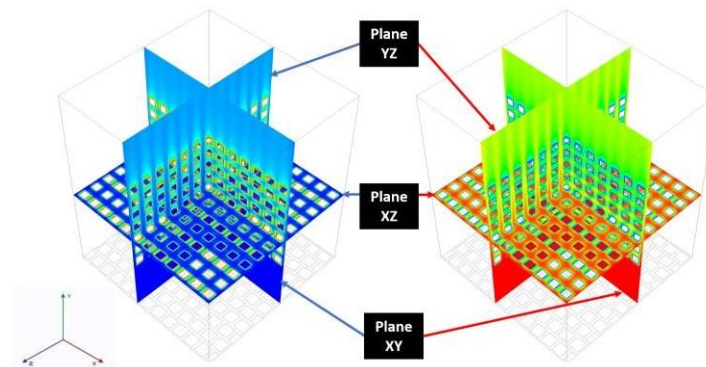
Susunan Perforated Plate	Kecepatan Fluidisasi	h simulasi	h perhitungan	Error
	m/s	W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K	%
Aligned	1,6	71,9319	69,2145	3,78
	2	83,1450	82,7418	0,60
	2,4	94,3996	95,7348	1,41
Staggered	1,6	70,0574	69,2145	1,20
	2	82,1058	82,7418	0,77
	2,4	93,3128	95,7348	2,60

#### 4.2.5 *Boundary Condition* untuk *Running* Berikutnya

*Running* selanjutnya, digunakan temperatur dan fraksi massa H<sub>2</sub>O yang terukur dari proses sebelumnya pada *software* Fluent 19.2 dan selanjutnya dilakukan iterasi untuk menghasilkan data-data seperti yang didapatkan dari hasil *running* sebelumnya. Data-data yang baru didapatkan tersebut diolah lagi untuk mendapatkan nilai waktu pengeringan batubara. *Running* dilakukan secara bertahap hingga nilai fraksi massa H<sub>2</sub>O pada batubara terakhir hampir sama atau tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan fraksi massa H<sub>2</sub>O dari data sebelumnya.

#### 4.3 Analisa Kontur

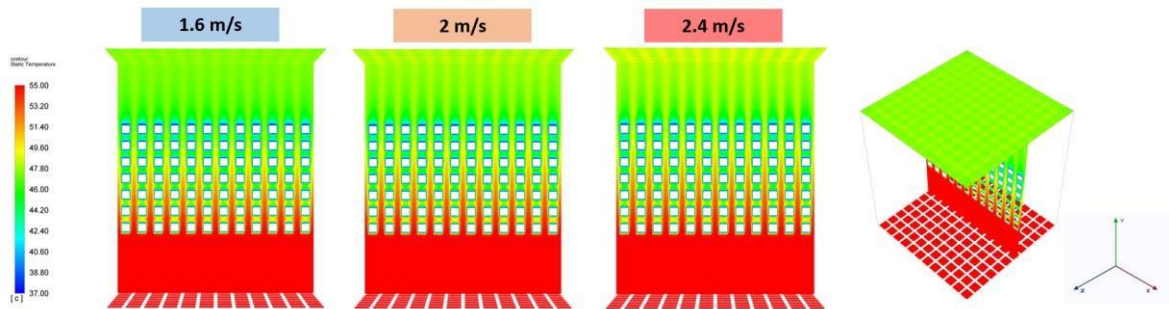
Dilakukan pengambilan data secara kualitatif berdasarkan kontur dari fraksi massa H<sub>2</sub>O atau *moisture content*. Untuk posisi pengambilan dilakukan pada potongan bidang tertentu agar mendapatkan kontur yang diinginkan, sebagaimana pada gambar 4.1 dibawah ini.





**Gambar 4.1** Posisi Pengambilan Bidang

### 4.3.1 Analisa Kontur Temperatur pada Variasi Kecepatan pada *Perforated Plate* Tersusun *Aligned*



**Gambar 4.2** Kontur Temperatur Bidang XY pada *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Kecepatan

Dari gambar 4.2 di atas diperoleh kontur temperatur pada temperatur 55°C *perforated plate* tersusun *aligned* dengan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s dan 2,4 m/s pada bidang XY 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. Dapat dilihat pula bahwa di daerah sekitar *tube* memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara pengering sekitar.

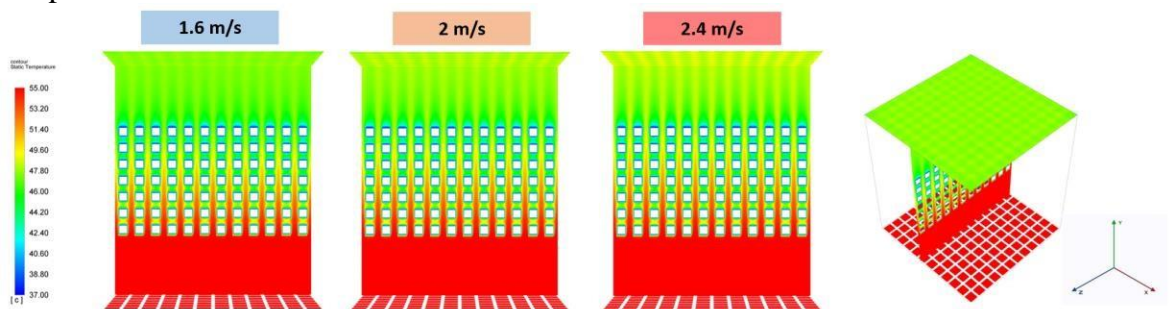
Kecepatan aliran udara akan memengaruhi besarnya volume udara yang masuk ke dalam *chamber* pengering. Semakin tinggi kecepatan maka semakin besar volume udara yang masuk. Dengan jumlah udara yang lebih banyak dapat menyerap *moisture content* yang lebih banyak pula walaupun hanya dengan penurunan temperatur yang lebih sedikit. Selain itu, semakin cepat udara bergerak maka kontak antara udara dan batubara akan semakin cepat juga sehingga penurunan temperatur udara pengering menjadi lebih rendah.

Secara teoritis fenomena turunnya temperatur *chamber* pengering terkait dengan terjadinya penurunan *drying rate* di dalam *fluidized bed coal dryer*. Turunnya temperatur ruangan akan menurunkan nilai koefisien perpindahan panas. Nilai koefisien perpindahan panas menentukan nilai koefisien perpindahan massa sesuai dengan persamaan

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

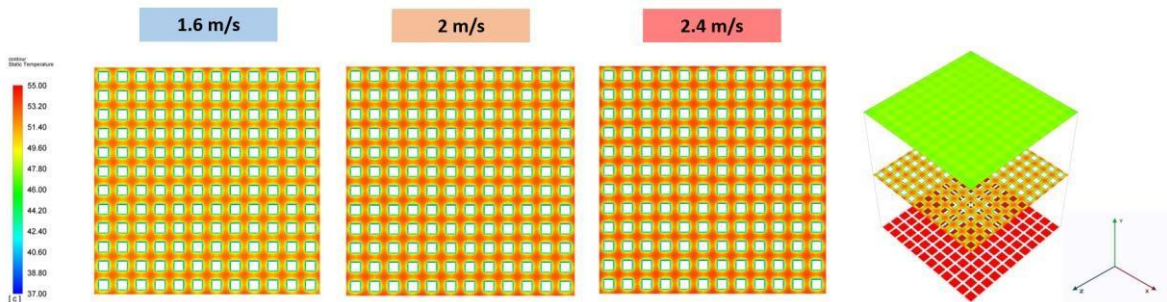
$$h_m = \frac{h \times D_{AB} \times Le^n}{k}$$

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 4.3** Kontur Temperatur Bidang YZ pada *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Kecepatan

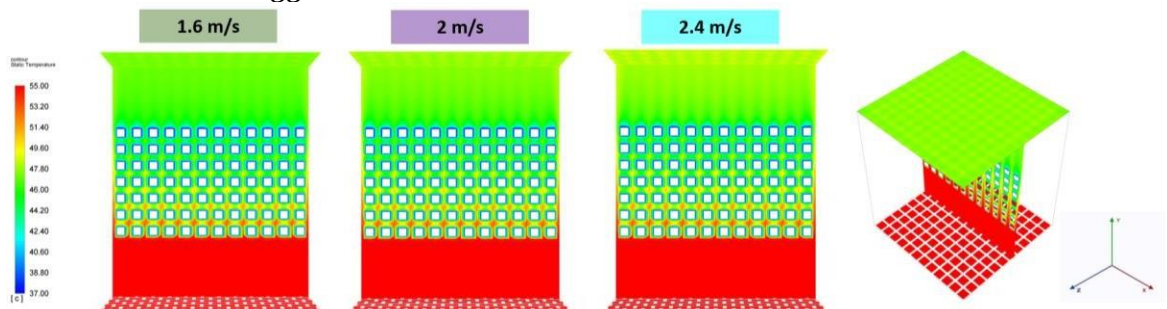
Dari gambar 4.3 di atas diperoleh kontur temperatur pada temperatur  $55^{\circ}\text{C}$  *perforated plate* tersusun *aligned* dengan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s dan 2,4 m/s pada bidang YZ memiliki temperatur pada sisi *outlet* yang lebih rendah dibandingkan daerah sisi *inlet* dan sisi tengah *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. Dapat dilihat pula bahwa di daerah sekitar *tube* memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara pengering sekitar. Untuk bentuk dari kontur bidang YZ ini kurang lebih sama, hanya perbedaan kecil pada sisi *outlet* yang terlihat, menunjukkan dengan kecepatan tertinggi 2,4 m/s maka memiliki jumlah *moisture content* paling sedikit dibandingkan dengan kecepatan yang lebih kecil.



**Gambar 4.4** Kontur Temperatur Bidang XZ pada *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Kecepatan

Dapat dilihat pada gambar 4.4 diatas bahwa kontur temperatur *plane XZ* pada temperatur  $55^{\circ}\text{C}$  *perforated plate* tersusun *aligned* dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan berdasarkan kontur yang ada, namun untuk perbedaan antara posisi tengah sampai ke *wall* tidak terlalu berbeda. Pada tiga variasi kecepatan *inlet*, menunjukkan bahwa kecepatan *inlet* 2,4 m/s memiliki nilai temperatur tertinggi dan 1,6 m/s adalah yang terendah.

#### 4.3.2 Analisa Kontur Temperatur pada Variasi Kecepatan pada *Perforated Plate* Tersusun *Staggered*



**Gambar 4.5** Kontur Temperatur Bidang XY pada *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Kecepatan

Dari gambar 4.5 di atas diperoleh kontur temperatur pada temperatur  $55^{\circ}\text{C}$  *perforated plate* tersusun *staggered* dengan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s dan 2,4 m/s pada bidang XY 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. Dapat dilihat pula bahwa di daerah sekitar *tube* memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara pengering sekitar.

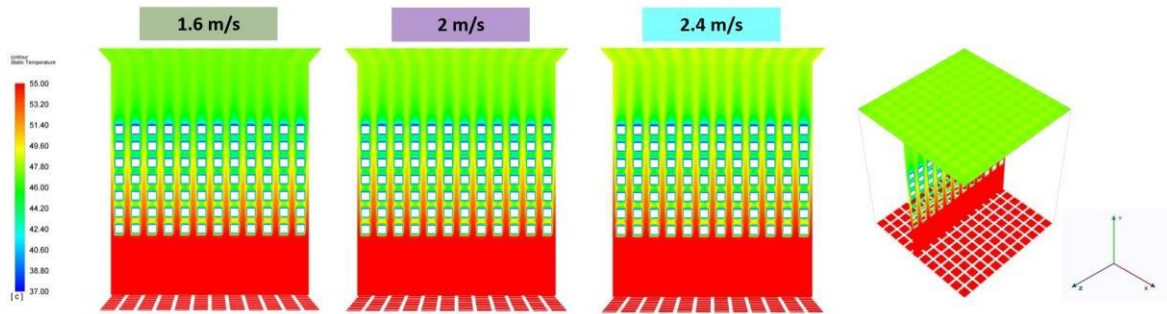
Kecepatan aliran udara akan memengaruhi besarnya volume udara yang masuk ke dalam *chamber* pengering. Semakin tinggi kecepatan maka semakin besar volume udara yang masuk. Dengan jumlah udara yang lebih banyak dapat menyerap *moisture content* yang lebih banyak pula walaupun hanya dengan penurunan temperatur yang lebih sedikit. Selain itu, semakin cepat udara bergerak maka kontak antara udara dan batubara akan semakin cepat juga sehingga penurunan temperatur udara pengering menjadi lebih rendah.

Secara teoritis fenomena turunnya temperatur *chamber* pengering terkait dengan terjadinya penurunan *drying rate* di dalam *fluidized bed coal dryer*. Turunnya temperatur ruangan akan menurunkan nilai koefisien perpindahan panas. Nilai koefisien perpindahan panas menentukan nilai koefisien perpindahan massa sesuai dengan persamaan

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

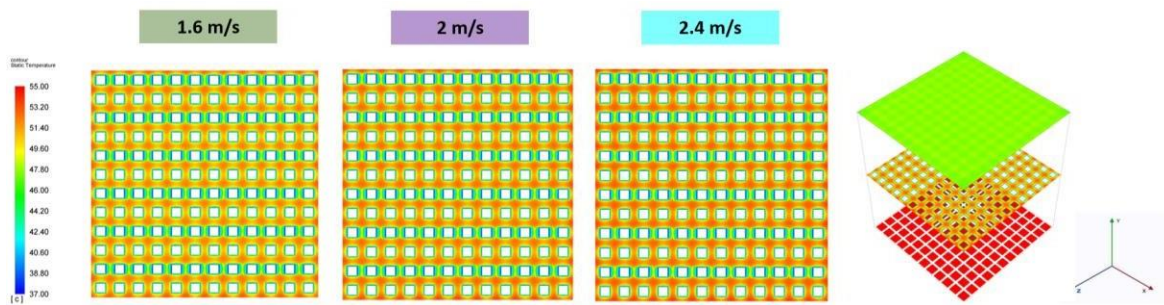
$$h_m = \frac{h \times D_{AB} \times Le^n}{k}$$

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 4.6** Kontur Temperatur Bidang YZ pada *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Kecepatan

Dari gambar 4.6 di atas diperoleh kontur temperatur pada temperatur 55°C *perforated plate* tersusun *staggered* dengan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s dan 2,4 m/s pada bidang YZ 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. Dapat dilihat pula bahwa di daerah sekitar *tube* memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara pengering sekitar. Untuk bentuk dari kontur bidang YZ ini kurang lebih sama, hanya perbedaan kecil pada sisi *outlet* yang terlihat, menunjukkan dengan kecepatan tertinggi 2,4 m/s maka memiliki jumlah *moisture content* paling sedikit dibandingkan dengan kecepatan yang lebih kecil.

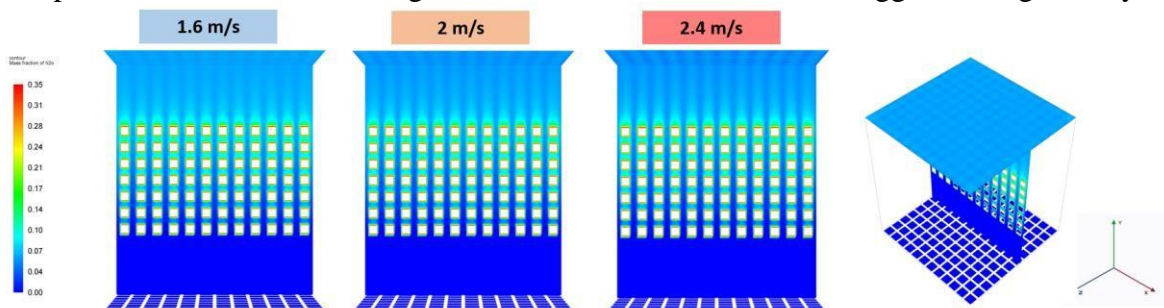


**Gambar 4.7** Kontur Temperatur Bidang XZ pada *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Kecepatan

Dapat dilihat pada gambar 4.7 diatas bahwa kontur temperatur *plane XZ* pada temperatur  $55^{\circ}\text{C}$  *perforated plate* tersusun *staggered* dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan berdasarkan kontur yang ada, namun untuk perbedaan antara posisi tengah sampai ke *wall* tidak terlalu berbeda. Pada tiga variasi kecepatan *inlet*, menunjukkan bahwa kecepatan *inlet* 2,4 m/s memiliki nilai temperatur tertinggi dan 1,6 m/s adalah yang terendah.

#### 4.3.3 Analisa Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada *Perforated Plate Tersusun Aligned* Variasi Kecepatan

Dapat diperhatikan pada gambar 4.8 dibawah bahwa kontur fraksi massa H<sub>2</sub>O *plane XY* dengan *perforated plate* tersusun *aligned* pada temperatur  $55^{\circ}\text{C}$  dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Ketiga kontur tersebut terlihat berbeda dari sisi *outlet*, warnayang ditunjukkan pada *outlet* sedikit berbeda disebabkan karena kandungan H<sub>2</sub>O pada sisi tersebut berbeda nilainya pada sisi *inlet* serta *outlet*. Jika diukur dari *inlet* dan semakin keatas menuju sisi *outlet*, kandungan air dari batubara terbawa oleh udara pengering menuju *outlet* sehingga kandungan air di atas semakin banyak. Proses tersebut juga terjadi penurunan *moisture content* yang terjadi pada batubara. Fenomena tersebut terjadi pada semua variasi kecepatan dari 1,6 m/s, 2 m/s, maupun 2,4 m/s. Semakin ke bagian atas *chamber* maka semakin tinggi kandungan airnya.



**Gambar 4.8** Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O Bidang XY pada *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Kecepatan

Berdasarkan teori hubungan antara kecepatan dengan laju pengurangan fraksi massa H<sub>2</sub>O dipaparkan dalam persamaan berikut.

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times d}{\mu}$$

$$\text{Nu} = \text{CRe}^m \text{Pr}^n$$

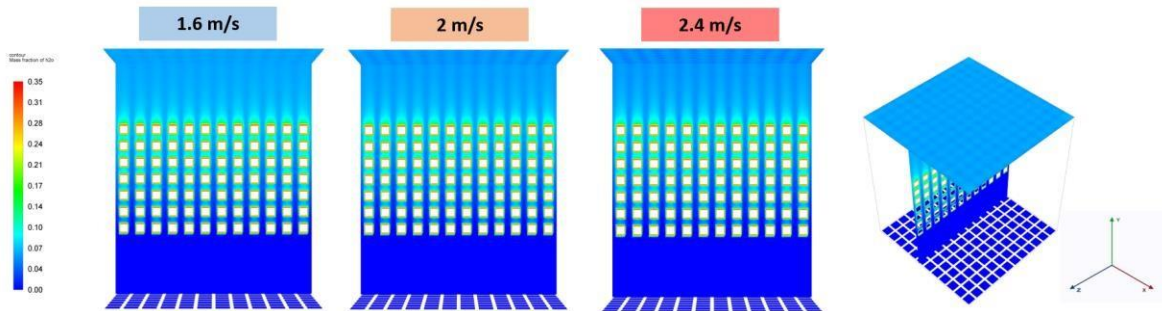
$$h = \frac{\text{Nu} \times k}{d}$$

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

Dari persamaan diatas, maka kecepatan udara memengaruhi *Reynold number* serta koefisien perpindahan panas dan massa. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, maka semakin tinggi koefisien perpindahan massanya. Sehingga *moisture* yang terkandung di dalam batubara akan lebih banyak diserap oleh udara pengering yang melewatinya.

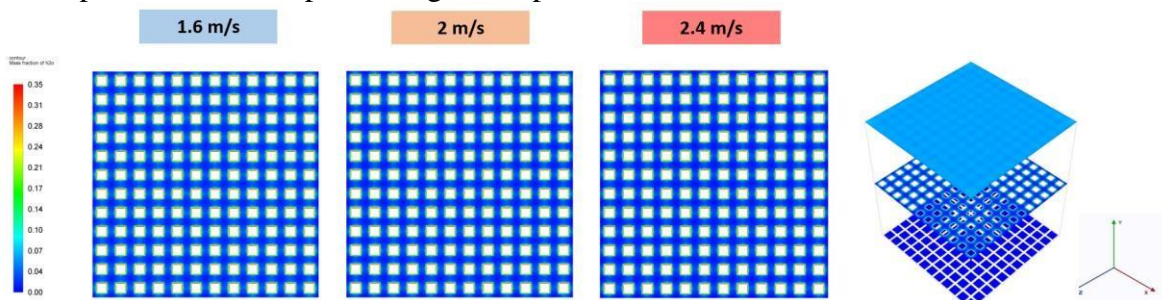
Pada temperatur 55°C dengan tiga variasi kecepatan *inlet*, menunjukkan bahwa kecepatan *inlet* 1,6 m/s memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H<sub>2</sub>O tertinggi dan 2,4 m/s adalah yang terendah. Jumlah air yang diuapkan dengan kecepatan *inlet* berbanding terbalik, yaitu 1,6 m/s menguapkan volume air terendah sedangkan 2,4 m/s adalah yang tertinggi.

Dapat dilihat pada gambar 4.9 di bawah bahwa kontur fraksi maasa H<sub>2</sub>O *plane YZ* pada temperatur 55°C dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Seperti halnya pada *plane XY*, Namun untuk *plane YZ* ini terlihat kontur nya cukup sama sedemikian hanya terlihat sedikit perbedaan dari sisi *outlet* yang dengan *perforated plate* tersusun *aligned* dengan kecepatan tertinggi yaitu 2,4 m/s hanya memiliki lebih sedikit kandungan air dibanding kecepatan yang lebih rendah.



**Gambar 4.9** Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O Bidang YZ pada *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Kecepatan

Untuk gambar 4.10 dibawah bahwa kontur fraksi massa H<sub>2</sub>O *plane XZ* pada temperatur 55°C *perforated plate* tersusun *aligned* dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan berdasarkan warna yang ada, namun untuk perbedaan antara posisi tengah sampai ke *wall* tidak terlalu berbeda.

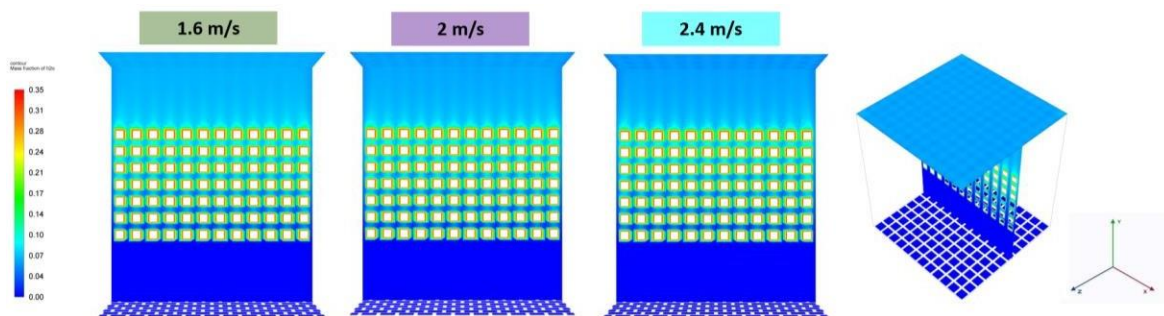


**Gambar 4.10** Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O Bidang XZ pada *Perforated Plate Aligned* dengan Variasi Kecepatan

Pada seluruh kontur temperatur 55°C dengan tiga variasi kecepatan *inlet*, menunjukkan bahwa kecepatan *inlet* 1,6 m/s memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H<sub>2</sub>O tertinggi dan 2,4 m/s adalah yang terendah. Jumlah air yang diuapkan dengan kecepatan *inlet* berbanding terbalik, yaitu 1,6 m/s menguapkan volume air terendah sedangkan 2,4 m/s adalah yang tertinggi.

#### 4.3.4 Analisa Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada *Perforated Plate* Tersusun *Staggered* Variasi Kecepatan

Dapat diperhatikan pada gambar 4.11 dibawah bahwa kontur fraksi massa H<sub>2</sub>O *plane* XY dengan *perforated plate* tersusun *staggered* pada temperatur 55°C dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Ketiga kontur tersebut terlihat berbeda dari sisi *outlet*, warnayang ditunjukkan pada *outlet* sedikit berbeda disebabkan karena kandungan H<sub>2</sub>O pada sisi tersebut berbeda nilainya pada sisi *inlet* serta *outlet*. Jika diukur dari *inlet* dan semakin keatas menuju sisi *outlet*, kandungan air dari batubara terbawa oleh udara pengering menuju *outlet* sehingga kandungan air di atas semakin banyak. Proses tersebut juga terjadi penurunan *moisture content* yang terjadi pada batubara. Fenomena tersebut terjadi pada semua variasi kecepatan dari 1,6 m/s, 2 m/s, maupun 2,4 m/s. Semakin ke bagian atas *chamber* maka semakin tinggi kandungan airnya.



**Gambar 4.11** Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O Bidang XY pada *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Kecepatan

Berdasarkan teori hubungan antara kecepatan dengan laju pengurangan fraksi massa H<sub>2</sub>O dipaparkan dalam persamaan berikut.

$$Re = \frac{\rho \times v \times d}{\mu}$$

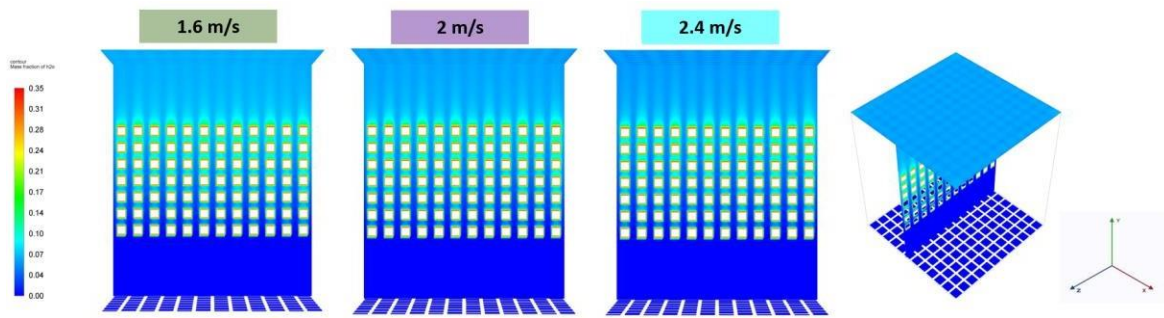
$$Nu = CRe^m Pr^n$$

$$h = \frac{Nu \times k}{d}$$

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

Dari persamaan diatas, maka kecepatan udara memengaruhi *Reynold number* serta koefisien perpindahan panas dan massa. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, maka semakin tinggi koefisien perpindahan massanya. Sehingga *moisture* yang terkandung di dalam batubara akan lebih banyak diserap oleh udara pengering yang melewatinya.

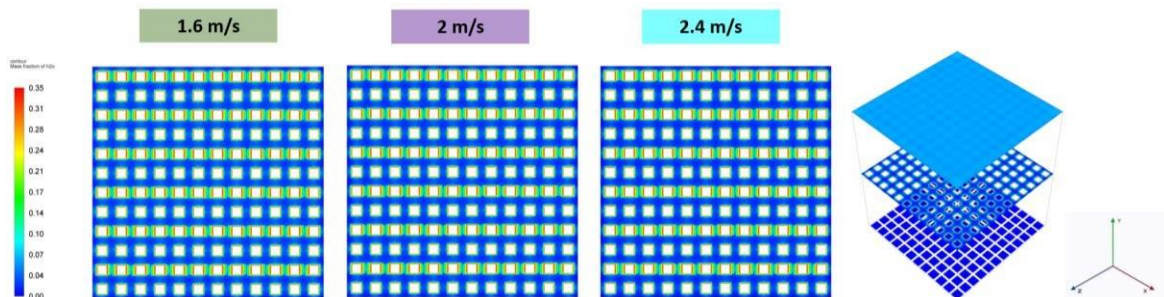
Pada temperatur 55°C dengan tiga variasi kecepatan *inlet*, menunjukkan bahwa kecepatan *inlet* 1,6 m/s memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H<sub>2</sub>O tertinggi dan 2,4 m/s adalah yang terendah. Jumlah air yang diuapkan dengan kecepatan *inlet* berbanding terbalik, yaitu 1,6 m/s menguapkan volume air terendah sedangkan 2,4 m/s adalah yang tertinggi.



**Gambar 4.12** Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O Bidang YZ pada *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Kecepatan

Dapat dilihat pada gambar 4.12 diatas bahwa kontur fraksi maasa H<sub>2</sub>O *plane YZ* pada temperatur 55°C *perforated plate* tersusun *staggered* dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Seperti halnya pada *plane XY*, Namun untuk *plane YZ* ini terlihat kontur nya cukup sama sedemikian hanya terlihat sedikit perbedaan dari sisi *outlet* yang dengan *perforated plate* tersusun *staggered* dengan kecepatan tertinggi yaitu 2,4 m/s hanya memiliki lebih sedikit kandungan air dibanding kecepatan yang lebih rendah.

Untuk gambar 4.13 dibawah bahwa kontur fraksi massa H<sub>2</sub>O *plane XZ* pada temperatur 55°C *perforated plate* tersusun *staggered* dan variasi kecepatan 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s memiliki perbedaan yang cukup signifikan berdasarkan warna yang ada, namun untuk perbedaan antara posisi tengah sampai ke *wall* tidak terlalu berbeda.



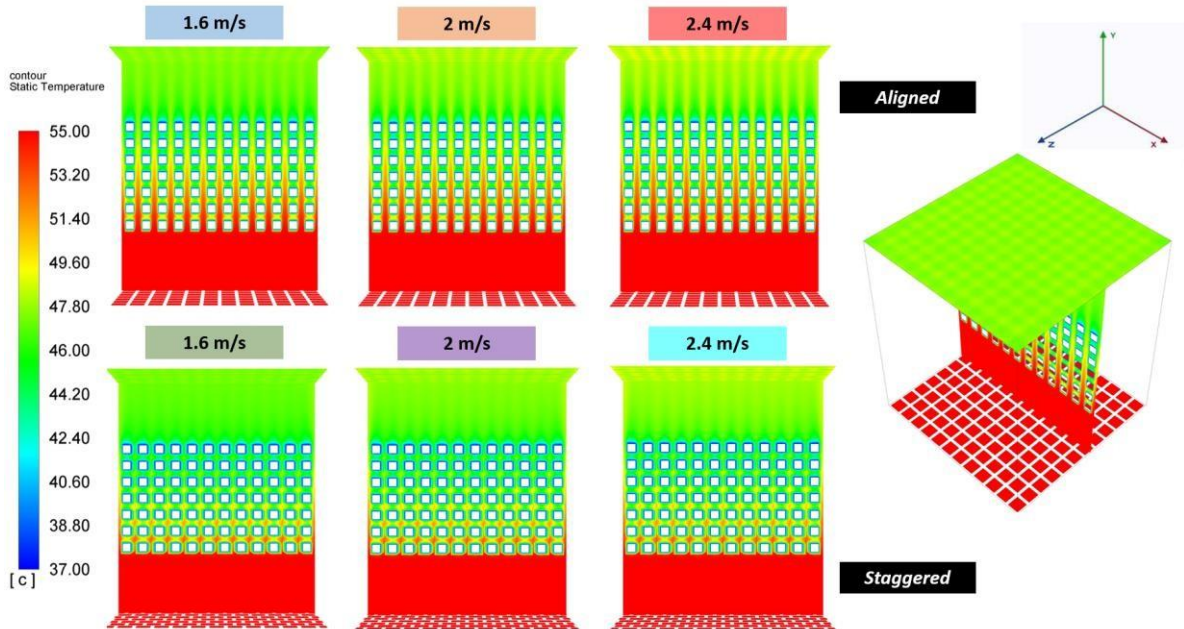
**Gambar 4.13** Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O Bidang XZ pada *Perforated Plate Staggered* dengan Variasi Kecepatan

Pada temperatur 55°C dengan tiga variasi kecepatan *inlet*, menunjukkan bahwa kecepatan *inlet* 1,6 m/s memiliki nilai *moisture content* atau fraksi massa H<sub>2</sub>O tertinggi dan 2,4 m/s adalah yang terendah. Jumlah air yang diuapkan dengan kecepatan *inlet* berbanding terbalik, yaitu 1,6 m/s menguapkan volume air terendah sedangkan 2,4 m/s adalah yang tertinggi.

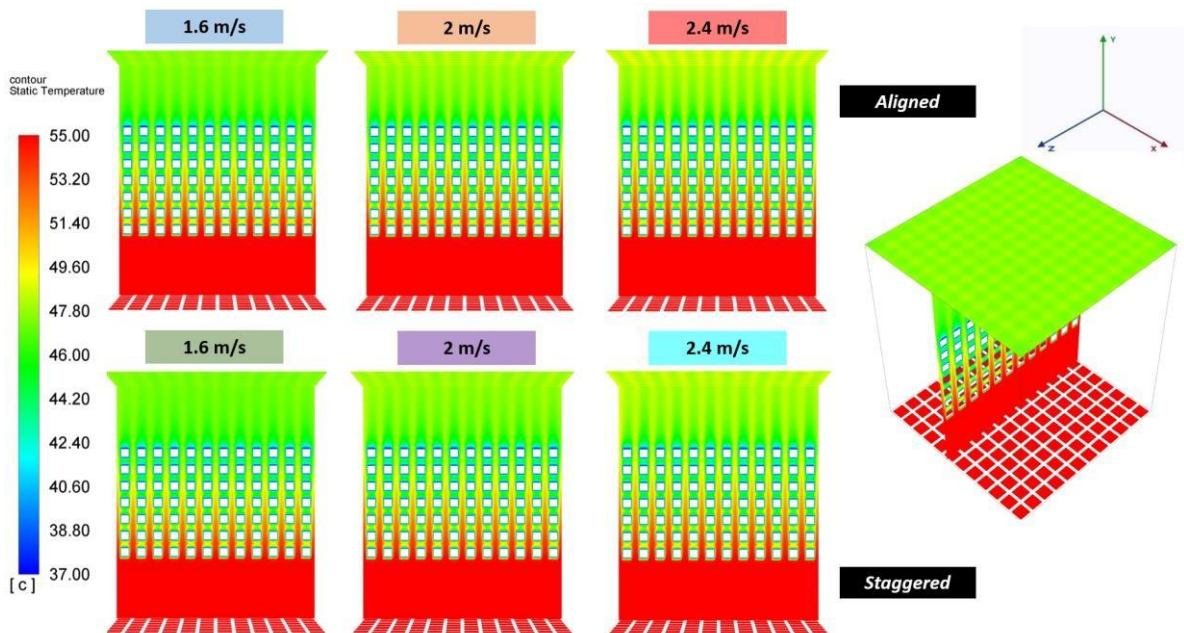


### 4.3.6 Analisa Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O dan Temperatur pada Variasi Susunan Lubang pada *Perforated Plate Staggered* dan *Aligned*

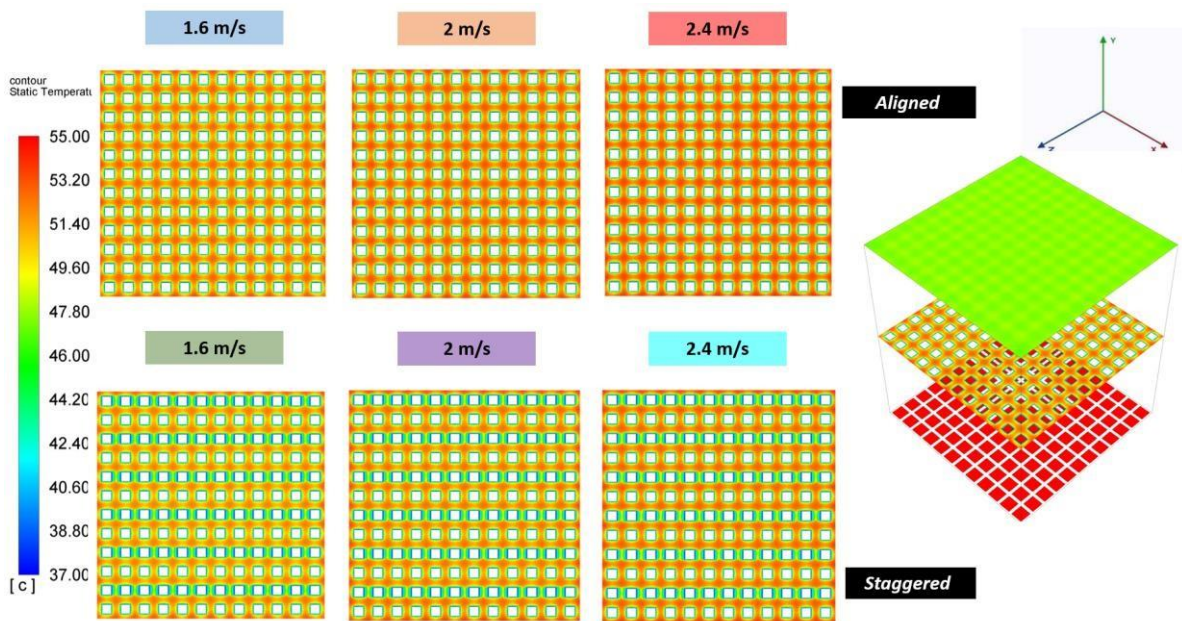
Berikut ini merupakan gambar dari kontur temperatur dan *moisture content*, yang ditunjukkan untuk melihat bagaimana perbedaan dari pengaruh susunan *perforated plate* baik secara *aligned* dan *staggered*.



(a)



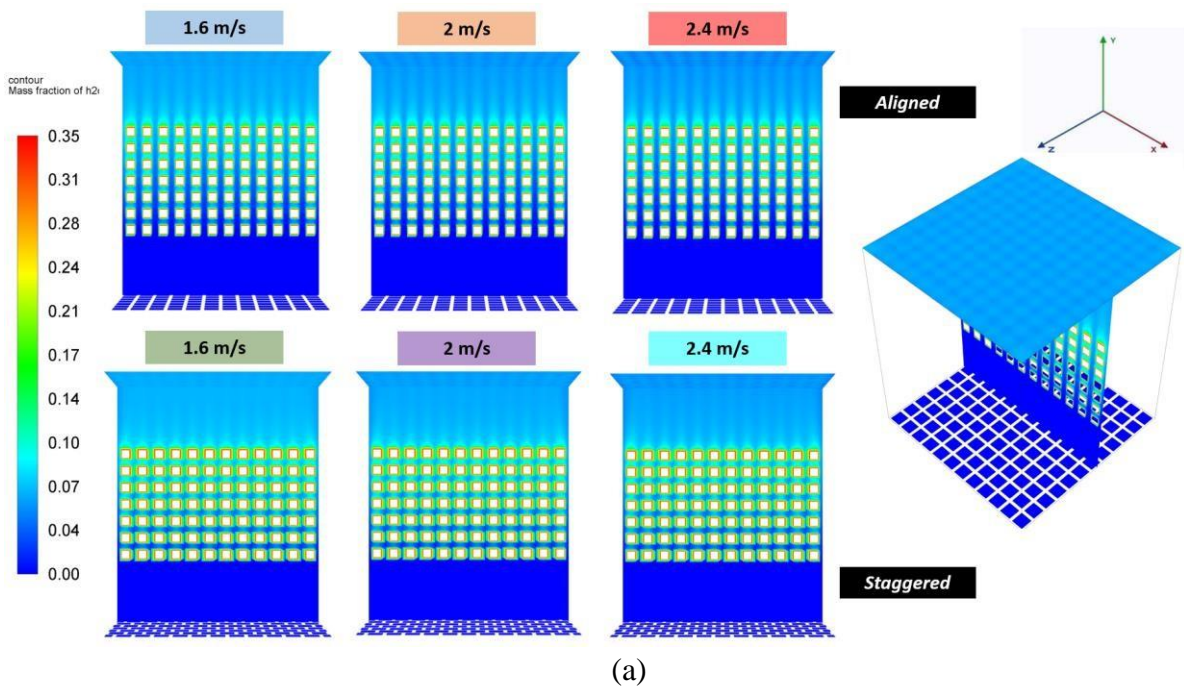
(b)



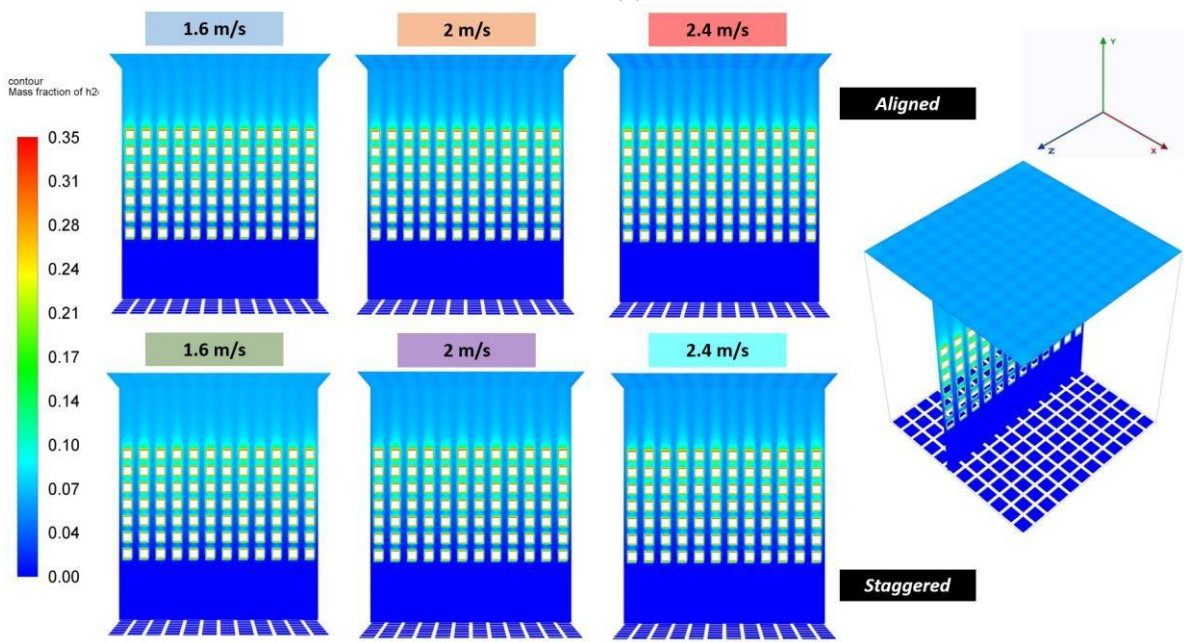
(c)

**Gambar 4.14** Kontur Temperatur Bidang (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ dengan Variasi *Perforated Plate*

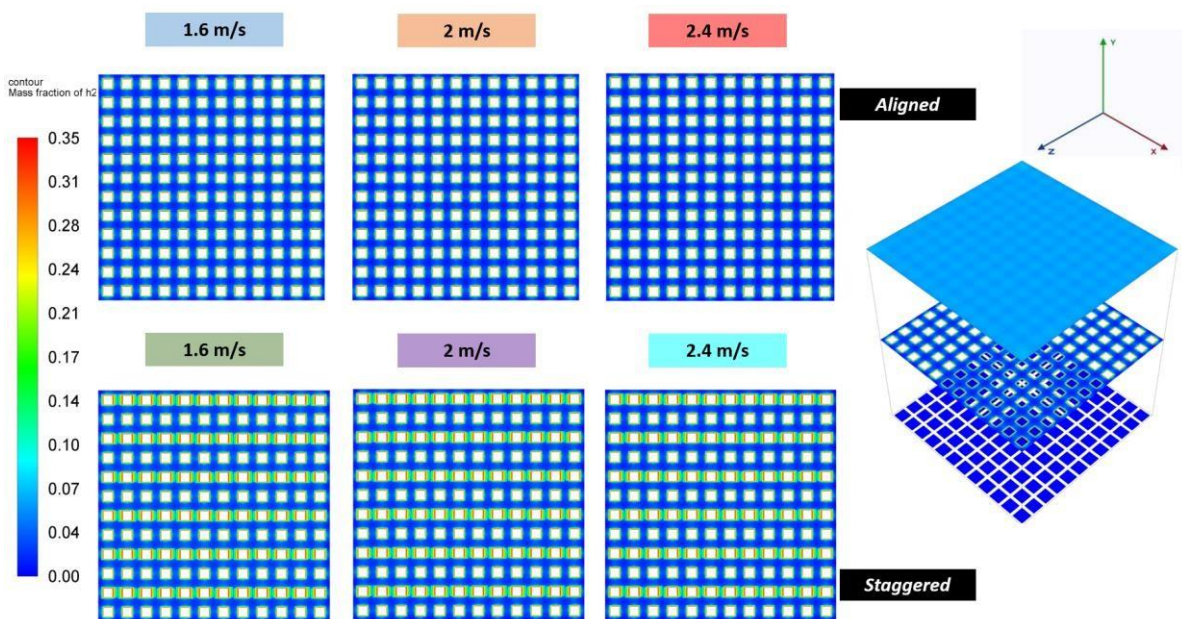
Terlihat pada gambar 4.14 yang merupakan gambaran kontur temperatur perbandingan antara *perforated staggered* dan *aligned*. Pada bidang XY sangat menampakkan perbedaan yang cukup signifikan yaitu ketika aliran udara tersebut melewati batubara maka yang terjadi adalah *aligned* udara mengalir secara rapi melewati ruang kosong antara batubara sedangkan untuk *staggered* aliran udara pengering lebih tercampur sama seperti ruang antar atas bawah batubara memiliki warna yang sama, atau lebih merata persebaran temperturnya. Pada *outlet* garis aliran yang terjadi setelah melewati batubara lebih terlihat tegas yang *aligned* daripada *staggered*. Selanjutnya pada bidang YZ konturnya memiliki perbedaan yang tidak terlalu signifikan seperti halnya bidang XY, hanya sedikit terjadi perbedaan temperatur yaitu antara *aligned* yang lebih tinggi daripada *staggered* pada sisi *outlet* nya. Dan yang terakhir pada bidang XZ temperatur yang ada tersebar merata disekitar batubara yang ada, dan terlihat juga perbedaan temperatur pada salah satu sisi tersebut bahwa *aligned* memiliki temperatur yang lebih tinggi daribada *staggered*.



(a)



(b)

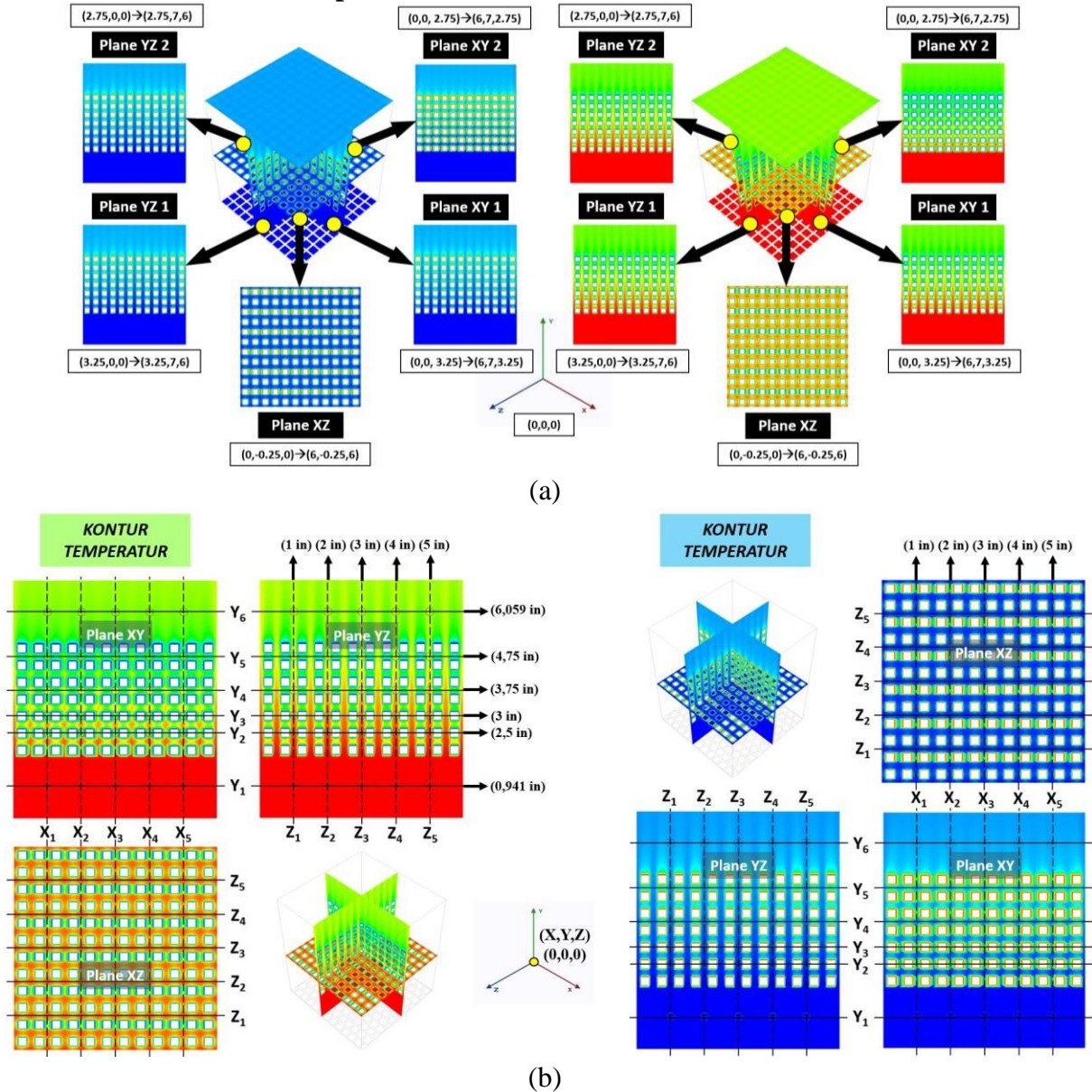


(c)

**Gambar 4.15** Kontur Fraksi Massa H<sub>2</sub>O Bidang (a) XY, (b) YZ, dan (c) XZ dengan Variasi *Perforated Plate*

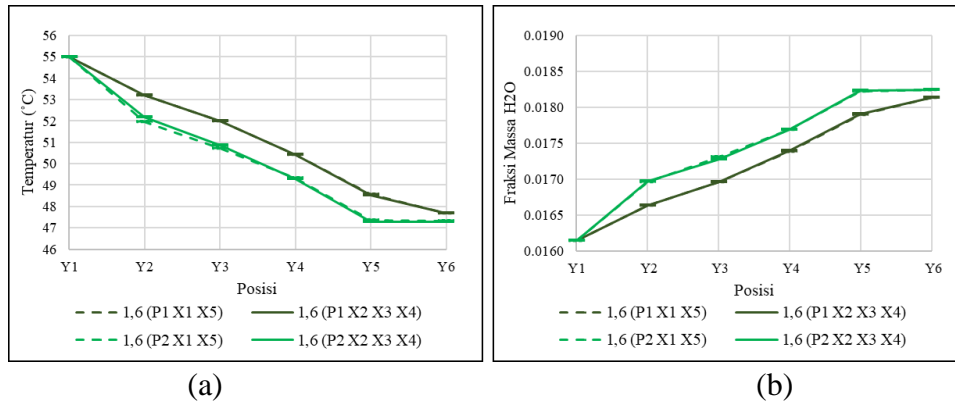
Terlihat pada gambar 4.15 yang merupakan gambaran kontur Fraksi massa H<sub>2</sub>O perbandingan antara *perforated staggered* dan *aligned*. Pada bidang XY sangat menampakkan perbedaan yang cukup signifikan yaitu ketika aliran udara tersebut melewati batubara maka yang terjadi adalah *aligned* udara mengalir secara rapi melewati ruang kosong antara batubara sedangkan untuk *staggered* aliran udara pengering lebih tercampur sama seperti ruang antar atas bawah batubara memiliki warna yang sama, atau lebih merata persebaran fraksi massanya. Pada *outlet* garis aliran yang terjadi setelah melewati batubara lebih terlihat tegas yang *aligned* daripada *staggered*. Selanjutnya pada bidang YZ konturnya memiliki perbedaan yang tidak terlalu signifikan seperti halnya bidang XY, hanya sedikit terjadi perbedaan fraksi massa yaitu antara *aligned* yang lebih rendah daripada *staggered* pada sisi *outlet* nya. Dan yang terakhir pada bidang XZ fraksi massa H<sub>2</sub>O yang ada tersebar merata disekitar batubara yang ada, dan terlihat juga perbedaan fraksi massa H<sub>2</sub>O pada salah satu sisi tersebut bahwa *aligned* memiliki fraksi massa H<sub>2</sub>O lebih rendah tinggi daripada *staggered*. Kontur fraksi massa H<sub>2</sub>O memiliki nilai yang terbalik dibandingkan temperatur, jika semakin tinggi temperatur maka semakin rendah fraksi massa H<sub>2</sub>O yang ada.

#### 4.4 Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H<sub>2</sub>O



**Gambar 4.16** Posisi Pengambilan (a)Bidang dan (b)Titik

Gambar 4.16 di atas adalah posisi bidang dan titik pengambilan data yang digunakan untuk menggambarkan distribusi temperatur dan *moisture content* pada ruang pengering batubara. Sehingga diperoleh data kuantitatif dari *plane* tertentu. Pada salah satu contoh misalnya saat distribusi temperatur kecepatan 1,6 m/s dengan *perforated plate* tersusun *staggered*, dari grafik distribusi temperatur bidang XY pada gambar 4.17 (a) saat titik X1 dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang sama dan saling berimpit begitu pula dengan *trendline* dari titik X2, X3, dan X4. Dapat diketahui seiring bertambahnya posisi vertikal atau sumbu y maka terjadi proses pendinginan karena udara pengering melewati batubara. Terjadi perbedaan antara *plane* 1 dan 2 (P1 dan P2), dimana yang pertama memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan yang kedua.



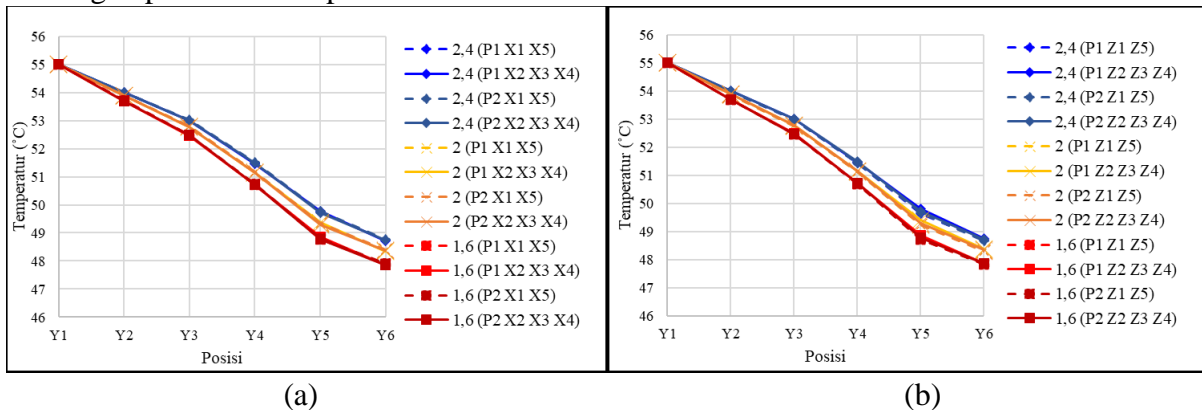
**Gambar 4.17** Grafik Distribusi (a)Temperatur dan (b)Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada Kecepatan 1,6 m/s dan *Perforated Plate Staggered Plane XY*

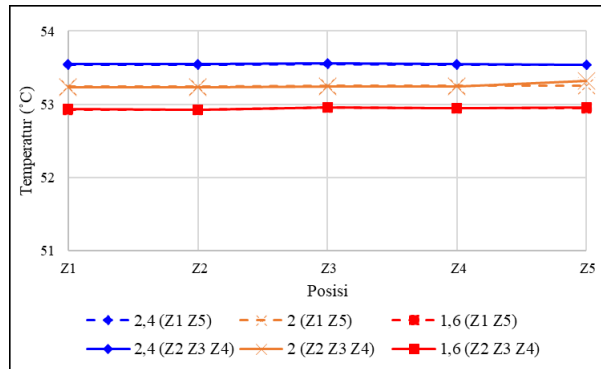
Pada distribusi *moisture content* atau fraksi massa H<sub>2</sub>O dapat dilihat bahwa garis X2, X3, dan X5 memiliki *trendline* distribusi yang hampir sama dan berimpitan nilainya, juga untuk garis X1 memiliki *trendline* yang identik dengan garis X5. Hal ini disebabkan adanya penyerapan kandungan air oleh udara pengering dari batubara. Hal ini diimbangi oleh udara pengering yang mengalami penurunan temperatur karena udara hanya melewati batubara saja. Semakin keatas maka semakin tinggi kandungan airnya. Sama seperti pada distribusi temperatur, terjadi perbedaan pada bidang 1 dan 2, yaitu kandungan air pada bidang yang pertama lebih rendah daripada yang kedua.

#### 4.4.1 Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada Variasi Kecepatan

Gambar-gambar di bawah menunjukkan distribusi temperatur dan *moisture content* pada setiap variasi kecepatan. Dapat dilihat bahwa pada setiap kenaikan kecepatan yang sama begitupula sebaliknya memiliki *trendline* yang sama. Pada grafik tersebut juga menunjukkan jika kecepatan yang digunakan semakin tinggi maka jumlah *moisture content* pada posisi 6 juga semakin rendah yang berarti semakin banyak *moisture* yang diserap oleh udara pengering.

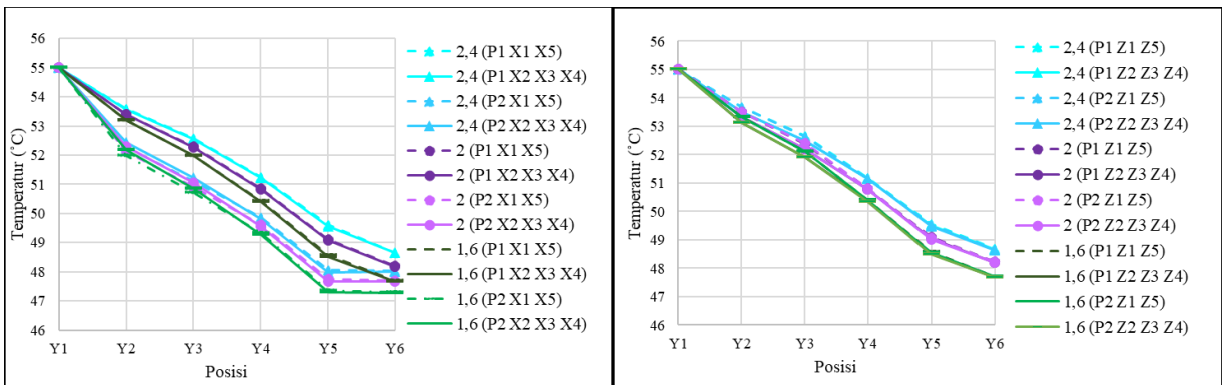
Pada gambar 4.18 di bawah adalah distribusi temperatur *perforated plate* tersusun *aligned* bidang XY, YZ, maupun XZ dengan variasi kecepatan memiliki perbedaan yang signifikan, trend grafik posisi *inlet* ke posisi *outlet* untuk bidang XY dan YZ selalu menurun dikarenakan terjadi penurunan temperatur karena semakin keatas jumlah batubara yang perlu dilewati semakin banyak, sedangkan bidang XZ terdistribusi secara merata pada setiap posisinya. Selain itu, temperatur tertinggi dialami oleh kecepatan tertinggi yaitu 2,4 m/s. Maka semakin tinggi kecepatan *inlet* udara pengering maka semakin tinggi pula temperatur. Perbedaan pada *plane* 1 dan 2 sangat kecil sehingga hampir sama nilainya begitu pula dengan posisi X1 sampai X5.





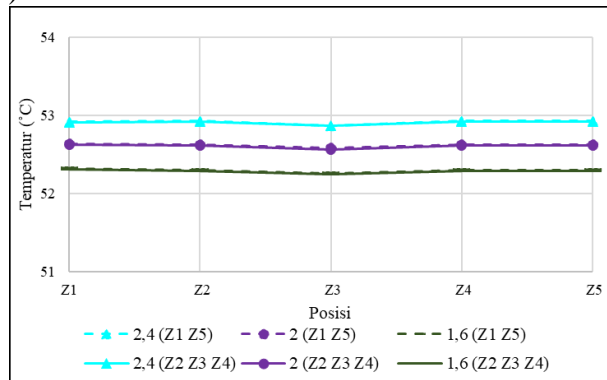
(c)

**Gambar 4.18** Grafik Distribusi Temperatur pada *Plane* (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi Kecepatan dengan *Perforated Plate* Tersusun *Aligned*



(a)

(b)

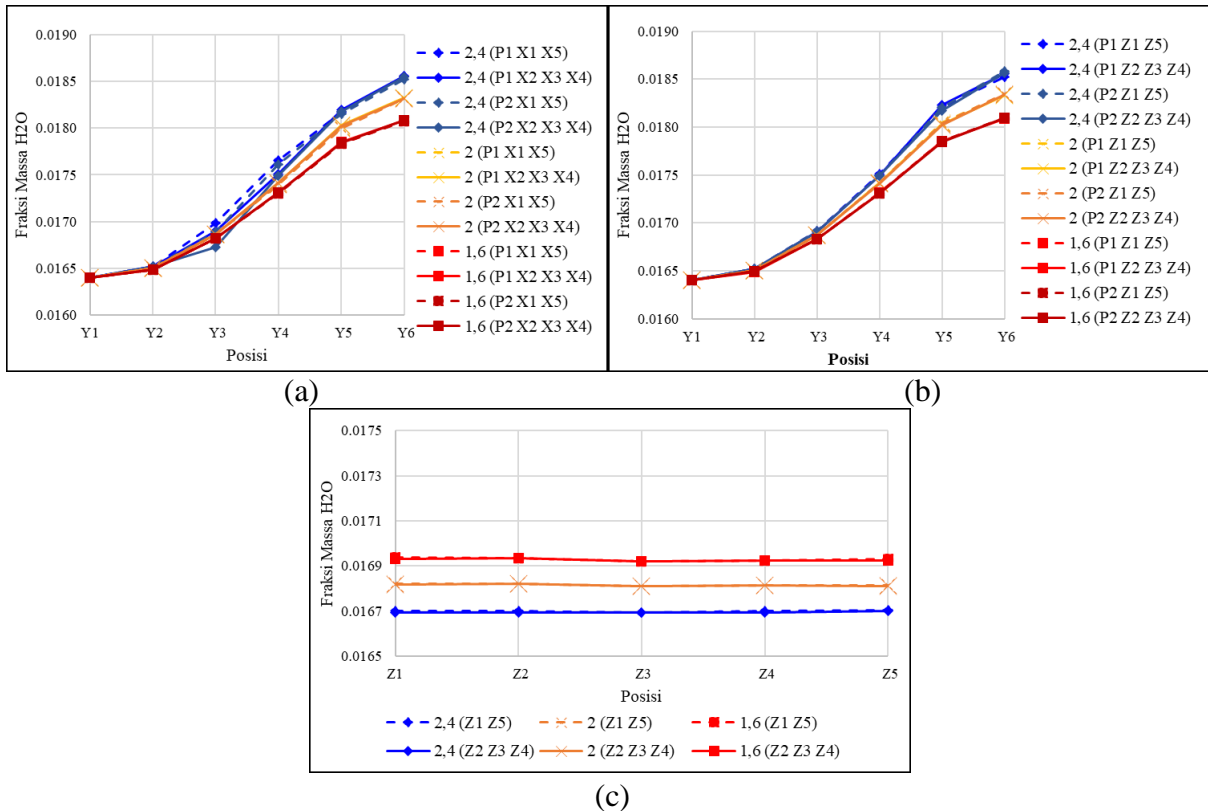


(c)

**Gambar 4.19** Grafik Distribusi Temperatur pada *Plane* (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi Kecepatan dengan *Perforated Plate* Tersusun *Staggered*

Pada gambar 4.19 di bawah adalah distribusi temperatur *perforated plate* tersusun *staggered* bidang XY, YZ, maupun XZ dengan variasi kecepatan memiliki perbedaan yang signifikan, trend grafik posisi *inlet* ke posisi *outlet* untuk bidang XY dan YZ selalu menurun dikarenakan terjadi penurunan temperatur karena semakin keatas jumlah batubara yang perlu dilewati semakin banyak, sedangkan bidang XZ terdistribusi secara merata pada setiap posisinya. Selain itu, temperatur tertinggi dialami oleh kecepatan tertinggi yaitu 2,4 m/s. Perbedaan pada *plane* 1 dan 2 cukup terlihat perbedaan, dikarenakan perbedaan persebaran temperatur yang berbeda dialkibatkan juga bentuk alirannya. Pada *plane* 2 memiliki temperatur yang lebih rendah daripada *plane* 1. Sedangkan, posisi X1 sampai X5 memiliki

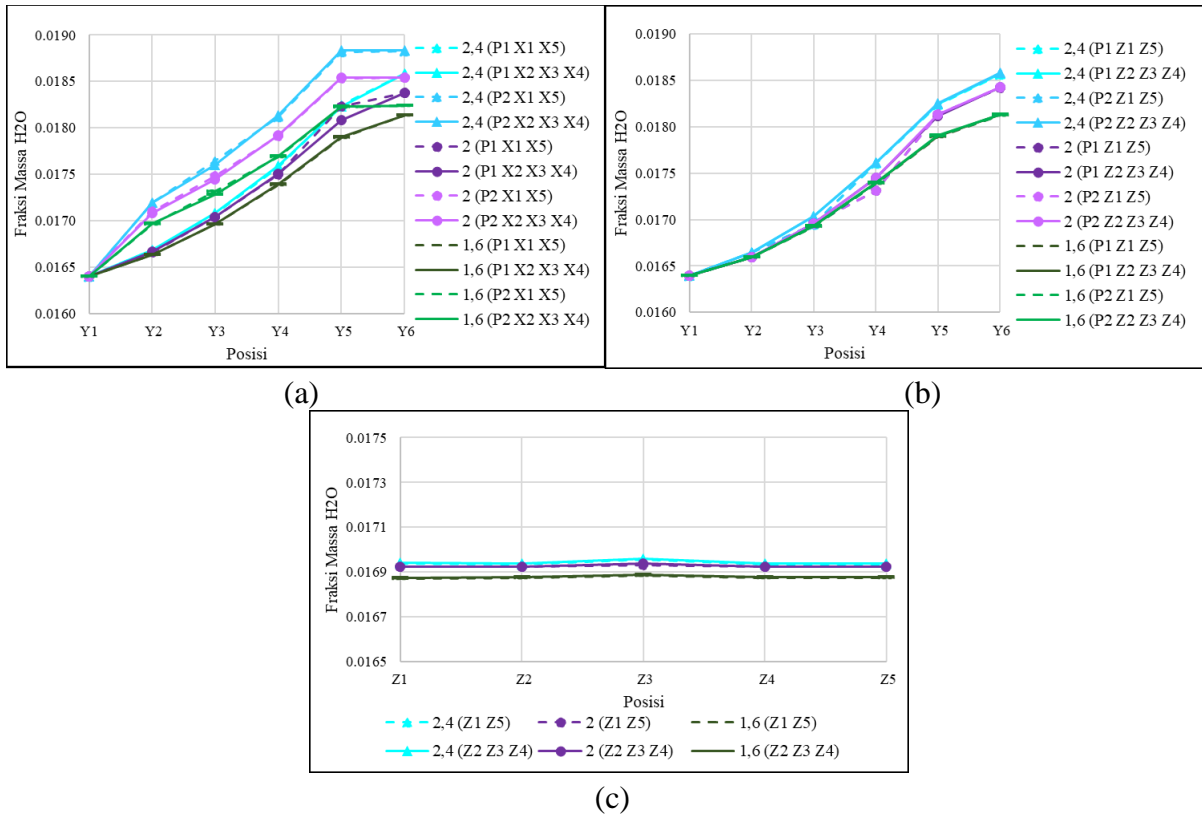
nilai yang hampir sama dilihat dari grafik yang berimpitan. Maka semakin tinggi kecepatan *inlet* udara pengering maka semakin tinggi pula temperatur.



**Gambar 4.20** Grafik Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada *Plane* (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi Kecepatan dengan *Perforated Plate Tersusun Aligned*

Pada gambar 4.20 di bawah adalah distribusi fraksi massa H<sub>2</sub>O *perforated plate* tersusun *aligned* bidang XY, YZ, maupun XZ dengan variasi kecepatan memiliki perbedaan yang signifikan, trend grafik posisi *inlet* ke posisi *outlet* untuk bidang XY dan YZ selalu naik dikarenakan terjadi kenaikan fraksi massa H<sub>2</sub>O, karena semakin keatas jumlah batubara yang perlu dilewati semakin banyak dan kemampuan penyerapan H<sub>2</sub>O oleh udara pengering semakin berkurang. Sedangkan bidang XZ terdistribusi secara merata pada setiap posisinya. Selain itu, fraksi massa H<sub>2</sub>O tertinggi dialami oleh kecepatan tertinggi yaitu 1,6 m/s. Maka semakin tinggi kecepatan *inlet* udara pengering maka semakin rendah fraksi massa H<sub>2</sub>O pada sisi *outlet*. Perbedaan pada *plane* 1 dan 2 sangat kecil sehingga hampir sama nilainya begitu pula dengan posisi X1 sampai X5.





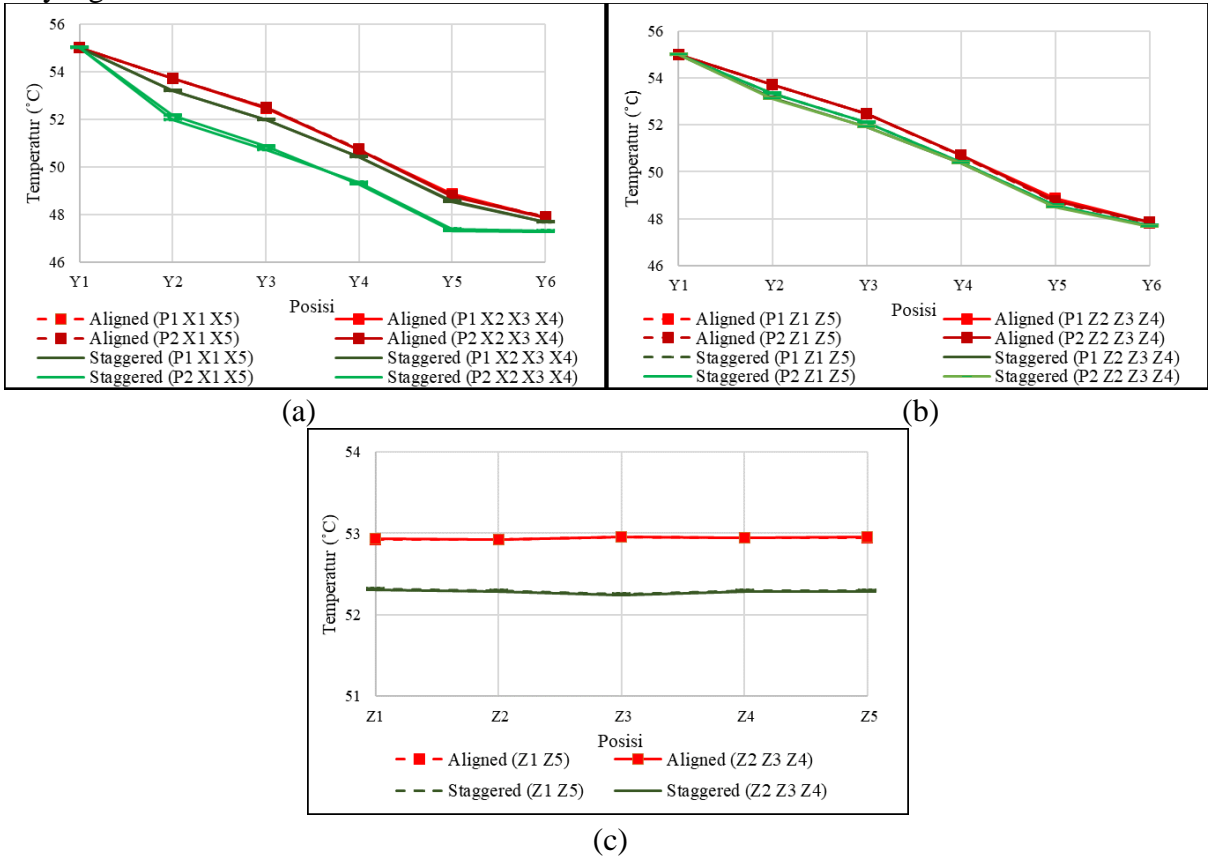
**Gambar 4.21** Grafik Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada *Plane* (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi Kecepatan dengan *Perforated Plate* Tersusun *Staggered*

Pada gambar 4.21 di bawah adalah distribusi fraksi massa H<sub>2</sub>O *perforated plate* tersusun *staggered* bidang XY, YZ, maupun XZ dengan variasi kecepatan memiliki perbedaan yang signifikan, trend grafik posisi *inlet* ke posisi *outlet* untuk bidang XY dan YZ selalu naik dikarenakan terjadi kenaikan fraksi massa H<sub>2</sub>O, karena semakin keatas jumlah batubara yang perlu dilewati semakin banyak dan kemampuan penyerapan H<sub>2</sub>O oleh udara pengering semakin berkurang. Sedangkan bidang XZ terdistribusi secara merata pada setiap posisinya. Selain itu, fraksi massa H<sub>2</sub>O tertinggi dialami oleh kecepatan tertinggi yaitu 1,6 m/s. Perbedaan pada *plane* 1 dan 2 cukup terlihat perbedaan, dikarenakan perbedaan persebaran temperatur yang berbeda dialkibatkan juga bentuk alirannya. Pada *plane* 2 memiliki temperatur yang lebih rendah daripada *plane* 1. Sedangkan, posisi X1 sampai X5 memiliki nilai yang hampir sama dilihat dari grafik yang berimpitan. Maka semakin tinggi kecepatan *inlet* udara pengering maka semakin tinggi pula temperatur.

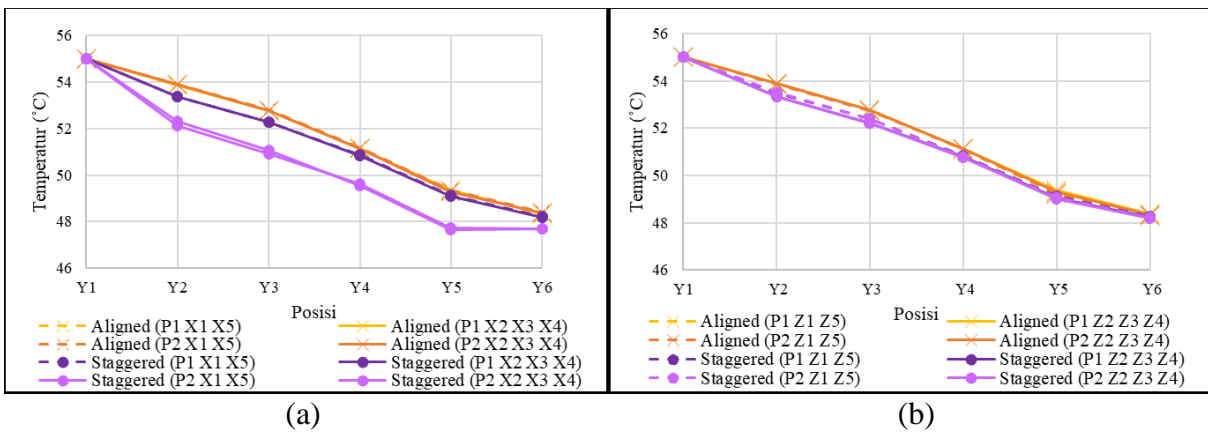
#### 4.4.2 Analisa Distribusi Temperatur dan Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada Variasi Kecepatan

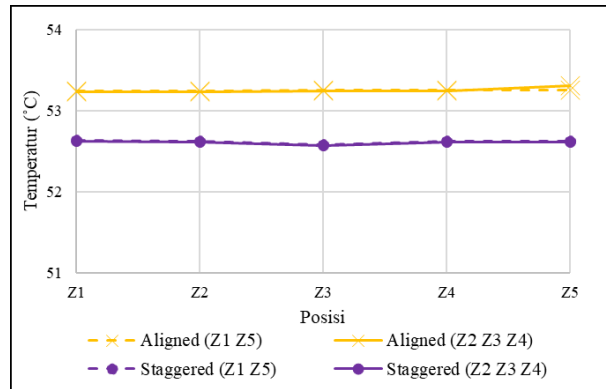
Gambar-gambar di bawah menunjukkan distribusi temperatur dan *moisture content* pada setiap variasi susunan *perforated plate* pada tiap grafiknya. Dapat dilihat bahwa pada setiap kenaikan kecepatan yang sama begitupula sebaliknya memiliki *trendline* yang sama. Pada grafik tersebut juga menunjukkan jika kecepatan yang digunakan semakin tinggi maka jumlah *moisture content* juga semakin rendah yang berarti semakin banyak *moisture* yang diserap oleh udara pengering. Namun terlihat perbedaan jika dengan susunan *aligned* maka memiliki temperatur yang tinggi dibandingkan *staggered*, sehingga berdampak pada *moisture content outlet* yang rendah apabila temperatur tinggi. Perbedaan antara *perforated plate staggered* dan *aligned* pada bidang XY, YZ, dan XZ baik temperatur maupun fraksi

massa H<sub>2</sub>O terletak pada nilainya, *aligned* memiliki nilai lebih tinggi dan fraksi massa H<sub>2</sub>O yang lebih rendah.



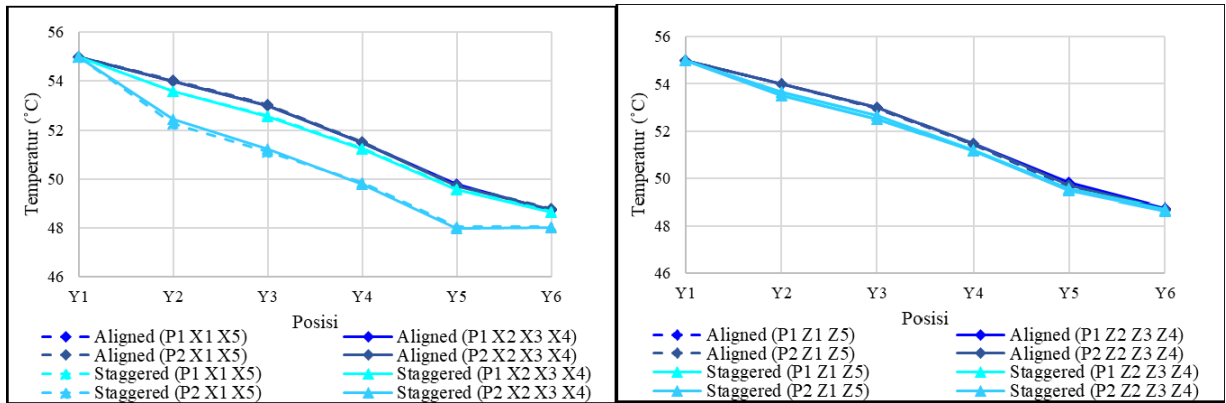
**Gambar 4.22** Grafik Distribusi Temperatur pada *Plane* (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi *Perforated Plate* dengan Kecepatan 1,6 m/s





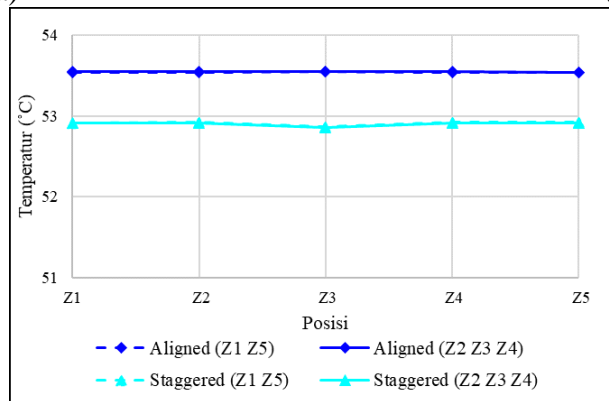
(c)

**Gambar 4.23** Grafik Distribusi Temperatur pada *Plane* (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi *Perforated Plate* dengan Kecepatan 2 m/s



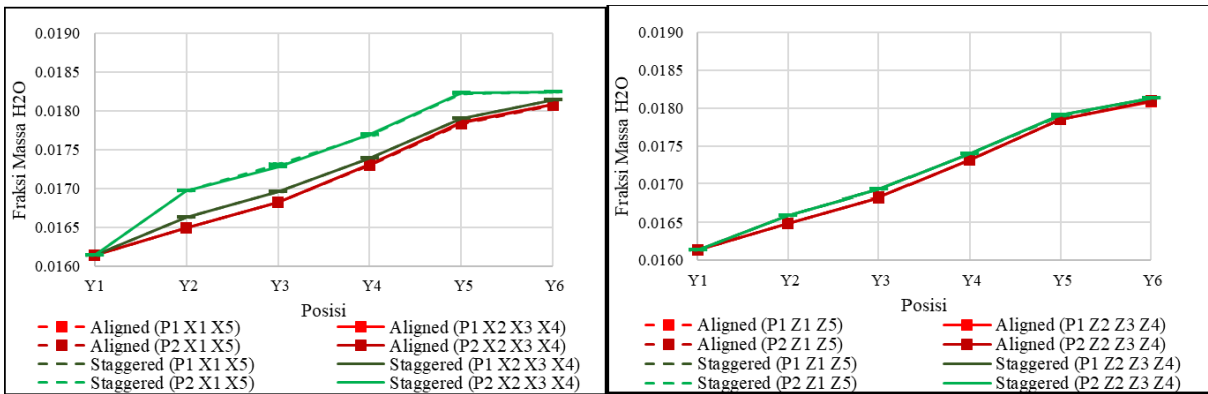
(a)

(b)



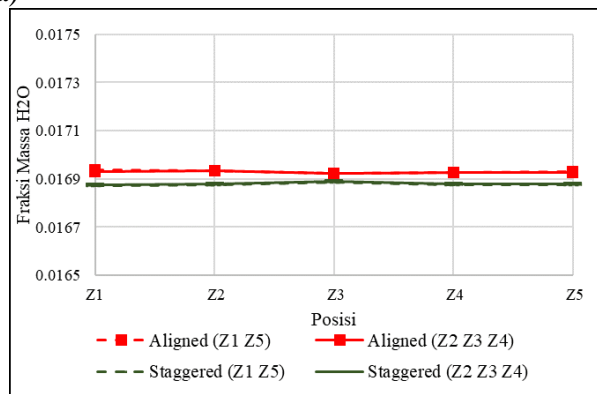
(c)

**Gambar 4.24** Grafik Distribusi Temperatur pada *Plane* (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi *Perforated Plate* dengan Kecepatan 2,4 m/s



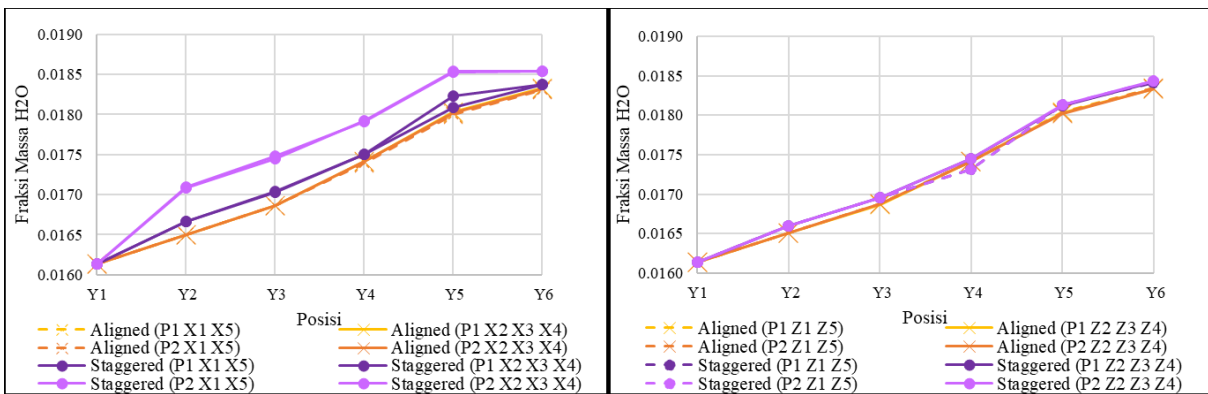
(a)

(b)



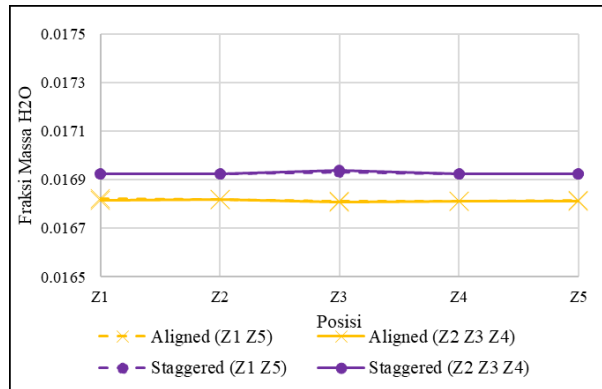
(c)

**Gambar 4.25** Grafik Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada Plane (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi Perforated Plate dengan Kecepatan 1,6 m/s



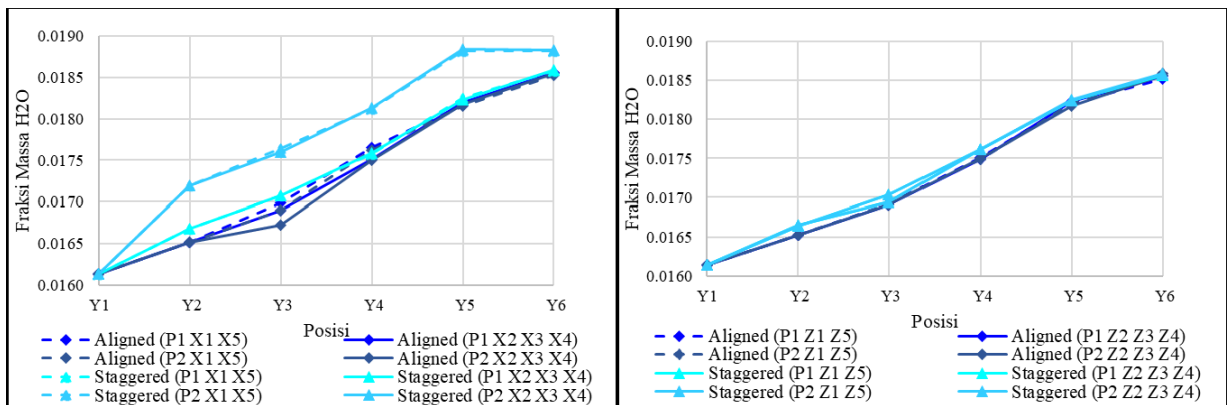
(a)

(b)



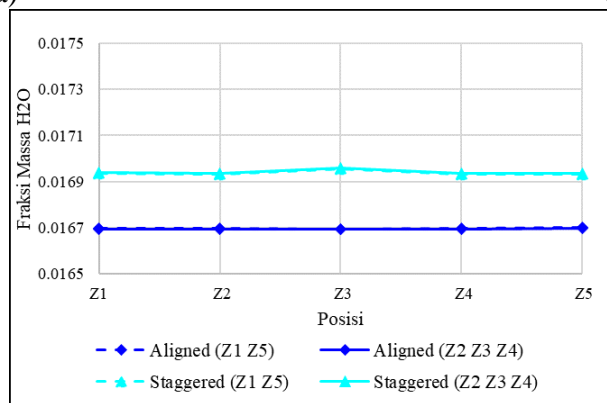
(c)

**Gambar 4.26** Grafik Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada Plane (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi *Perforated Plate* dengan Kecepatan 2 m/s



(a)

(b)

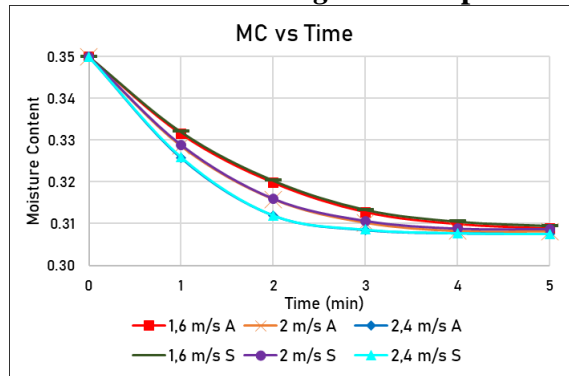


(c)

**Gambar 4.27** Grafik Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O pada Plane (a)XY, (b)YZ, dan (c)XZ Variasi *Perforated Plate* dengan Kecepatan 2,4 m/s

4.5

**Analisa Perubahan *Moisture Content Average* terhadap Waktu**



**Gambar 4.28** Grafik Perubahan *Moisture Content Average* terhadap Waktu

Proses pengeringan terjadi saat udara pengering yang lebih panas melewati batubara dan terjadi proses perpindahan panas yang akan menaikkan temperatur dan tekanan uap air di permukaan batubara. Sehingga terjadi perpindahan dalam bentuk uap air dari permukaan batubara ke udara pengering dan *moisture content* pada batubara akan semakin berkurang. Secara teori, nilai koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi nilai laju perpindahan massa. Nilai koefisien perpindahan massa berbanding lurus dengan *moisture content* batubara terhadap waktu pengeringan sehingga ketika nilai perpindahan massa meningkat akan diikuti dengan peningkatan laju perpindahan massa.

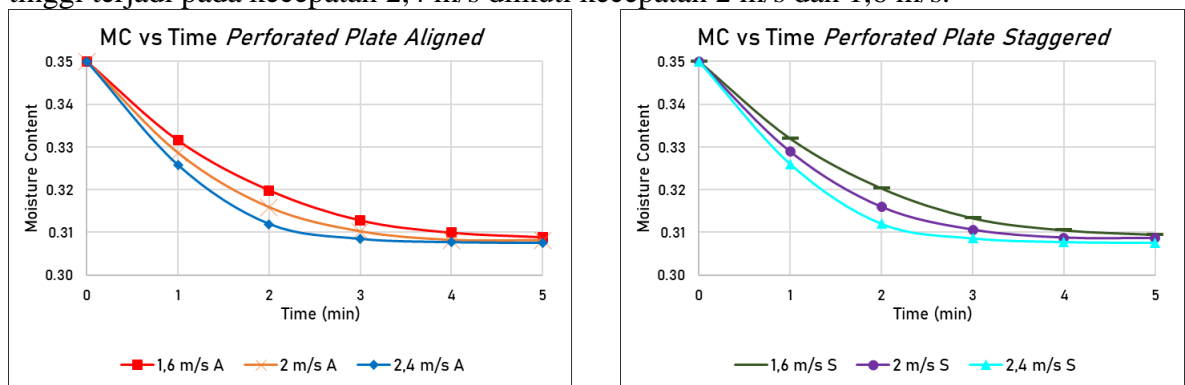
$$n_A = h_m \times A \times (\rho_{H_2O,coal} - \rho_{H_2O,inlet})$$

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

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

**4.5.1 Analisa Perubahan *Moisture Content* terhadap Waktu pada Variasi Kecepatan**

Pada gambar 4.25 di bawah menunjukkan perubahan *moisture content* terhadap waktu untuk setiap variasi kecepatan. Ketiga gambar grafik tersebut memperlihatkan *trend* yang hampir sama, yaitu terjadi perubahan *moisture content* yang signifikan lalu berubah menjadi landai. Dari semua temperatur yang digunakan, penurunan *moisture content* paling tinggi terjadi pada kecepatan 2,4 m/s diikuti kecepatan 2 m/s dan 1,6 m/s.



(a)

(b)

**Gambar 4.29** Grafik Perubahan *Moisture Content Average* Variasi Kecepatan pada *Perforated Plate* Tersusun (a)*Aligned* dan (b)*Staggered*

Untuk perubahan *moisture content* terhadap waktu, dengan nilai fraksi massa awal yang sama yaitu 0,35. Rincian perubahan *moisture content* akhir yaitu pada menit kelima pada *perforated plate aligned* dengan beberapa variasi 1,6 m/s mencapai 0,30882 (30,882%), lalu 2 m/s menjadi 0,30811 (30,811%), serta 2,4 m/s memiliki perubahan fraksi massa kandungan air 0,30746 (30,746%), yang dimana menunjukkan hasil dengan kecepatan udara pengering *inlet* tertinggi dengan waktu yang sama maka akan lebih cepat menurunkan H<sub>2</sub>O pada batubara. Hasil yang sama juga ditunjukkan pada *perforated plate* yang tersusun secara *staggered* dengan kecepatan 1,6 m/s menjadi 0,30947 (30,947%), selanjutnya dengan kecepatan *inlet* udara pengering 2 m/s yaitu 0,30866 (30,866%), dan 2,4 m/s menunjukkan perubahan *moisture content* 0,30754 (30,754%). Untuk *trendline* dari grafik tersebut sama yaitu semakin menurun dan pada menit kelima hampir sama menuju ke satu garis, untuk yang tercepat mencapai landai adalah dengan kecepatan inlet 2,4 m/s pada menit ketiga kemudian 2 m/s pada menit keempat diikuti 1,6 m/s pada menit kelima. Berdasarkan rumus koefisien perpindahan panas konveksi:

$$h = \frac{Nu \times k}{d}$$

$$Nu = \frac{f(Re, Pr)}{h \times D_{AB} \times Le^n}$$

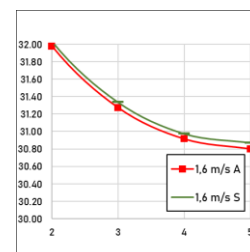
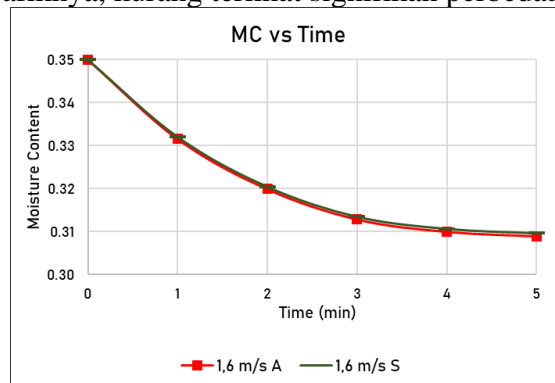
$$h_m = \frac{k}{d}$$

Kecepatan udara memengaruhi *Reynold number* serta koefisien perpindahan panas dan massa. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, maka semakin tinggi koefisien perpindahan massanya. Sehingga *moisture* yang terkandung di dalam batubara akan lebih banyak diserap oleh udara pengering yang melewatinya.

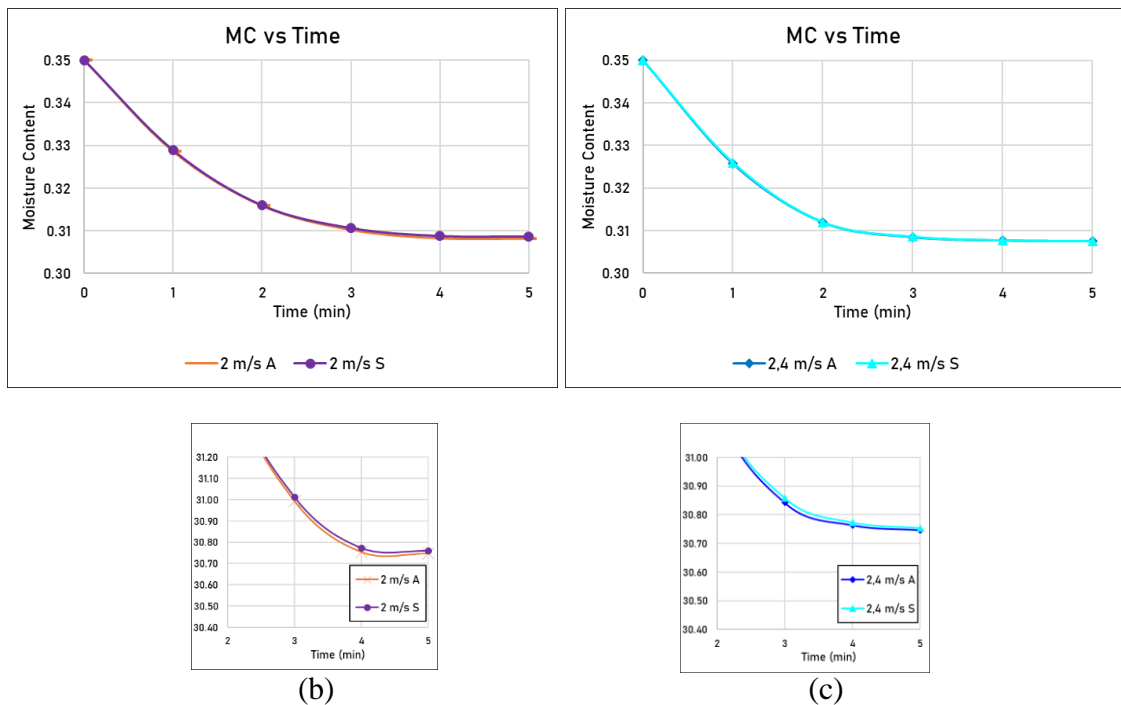
Kecepatan aliran udara akan memengaruhi besarnya volume udara yang masuk ke dalam *drying chamber*. Semakin tinggi kecepatan maka semakin besar jumlah udara yang masuk, sehingga kemampuan udara pengering untuk membawa dan menampung air dari permukaan batubara akan meningkat dan proses pengeringan akan menjadi semakin cepat.

#### 4.5.2 Analisa Perubahan Moisture Content terhadap Waktu pada Variasi Susunan Lubang Perforated Plate

Pada grafik 4.26 di bawah ini di dapatkan *trendline* grafik perubahan *moisture content* batubara terhadap waktu pengeringan untuk variasi susunan lubang *perforated plate* secara *aligned* dan *staggered*. Ketiga gambar grafik tersebut memperlihatkan *trend* yang hampir sama, yaitu terjadi perubahan *moisture content* yang signifikan lalu berubah menjadi landai. Dari ketiga grafik tersebut terlihat saling berimpit yang mana menandakan hampir sama grafiknya, kurang terlihat signifikan perbedaannya.

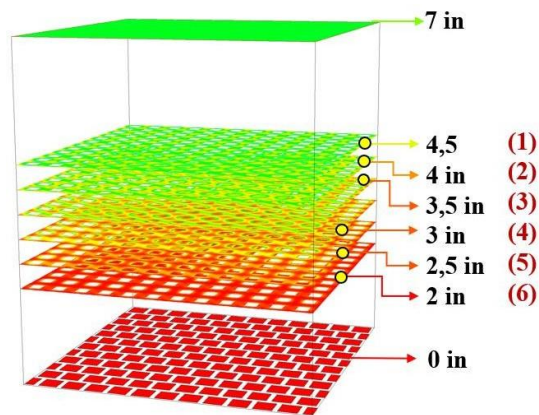


(a)



**Gambar 4.30** Grafik Perubahan *Moisture Content Average* Variasi Susunan *Perforated Plate* pada Kecepatan (a)1,6 m/s, (b)2 m/s, dan (c)2.4 m/s

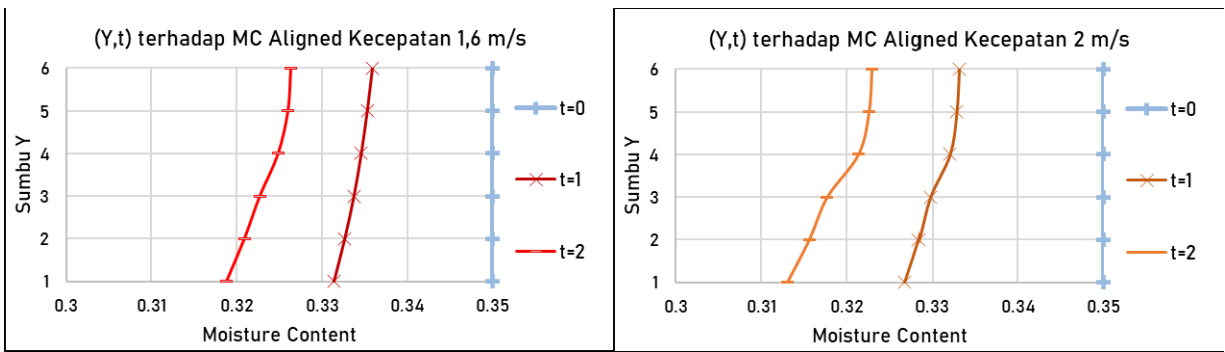
#### 4.6 Analisa Elevasi Sumbu Y dan Waktu(Y,t) terhadap *Moisture Content*



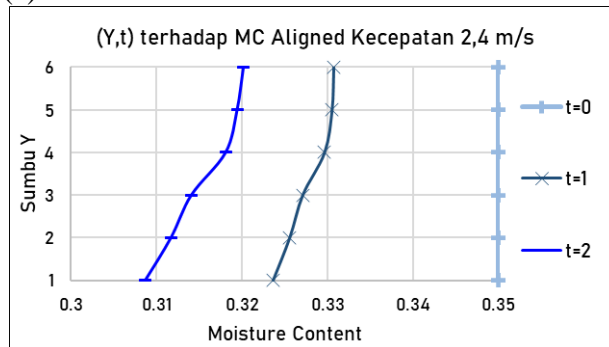
**Gambar 4.31** Posisi Pengambilan Nilai pada Elevasi Y

Pada gambar 4.31 kita dapat mencari nilai rata-rata pada elevasi Y tertentu seperti yang tertera, kemudian dihitung seperti pada contoh perhitungan sehingga diperoleh hasil *moisture content* batubara akhir pada ketinggian tertentu yang berbeda. Untuk *trendline*-nya pada setiap grafik memiliki hasil yang sama untuk waktu awal pada menit ke-0 sama yaitu senilai 0,35, lalu pada menit pertama sudah mulai terlihat perbedaan untuk posisi terbawah penurunannya sangat signifikan lalu semakin keatas semakin sedikit lebih tinggi. Dan pada menit kedua perbedaan *moisture content*(MC) semakin besar *range* antara elevasi atas dan bawah. Untuk *aligned* terjadi perbedaan penurunan MC pada elevasi 3 ke 4 yang paling terlihat sedangkan untuk *staggered* trendlinenya selalu menurun secara bertahap lebih merata. Dari data yang diperoleh, hasil dari MC paling dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas, semakin tinggi koefisien perpindahan panas maka memengaruhi ke koefien perpindahan massa dan berpengaruh ke MC.



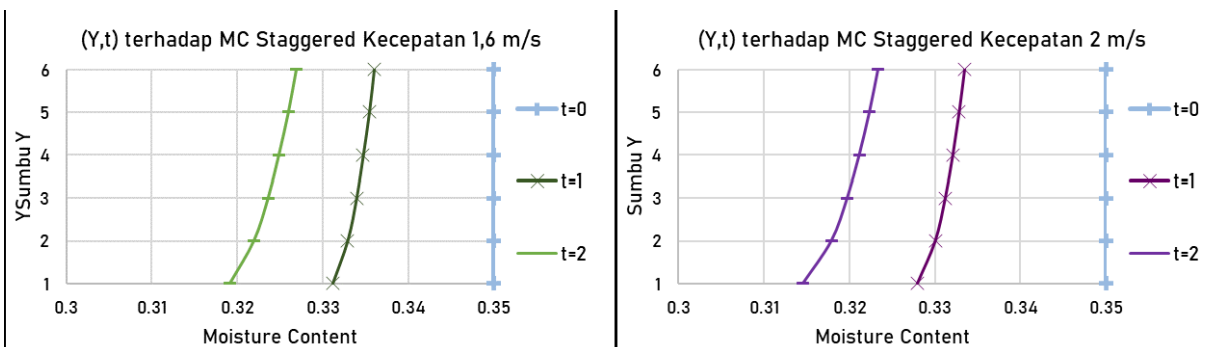


(a) (b)

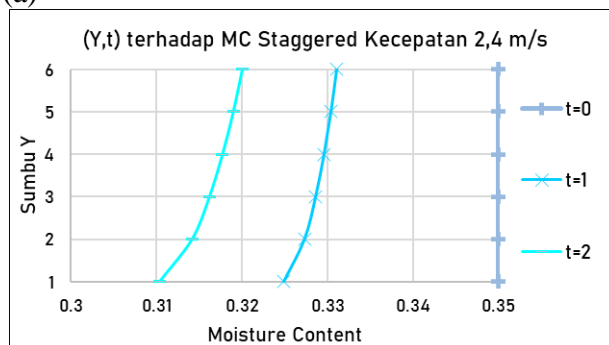


(c)

**Gambar 4.32** Grafik Elevasi Y fungsi waktu terhadap Moisture Content dengan Variasi Kecepatan (a)1,6 m/s, (b)2 m/s, dan (c)2.4 m/s *Perforated Plate Aligned*



(a) (b)

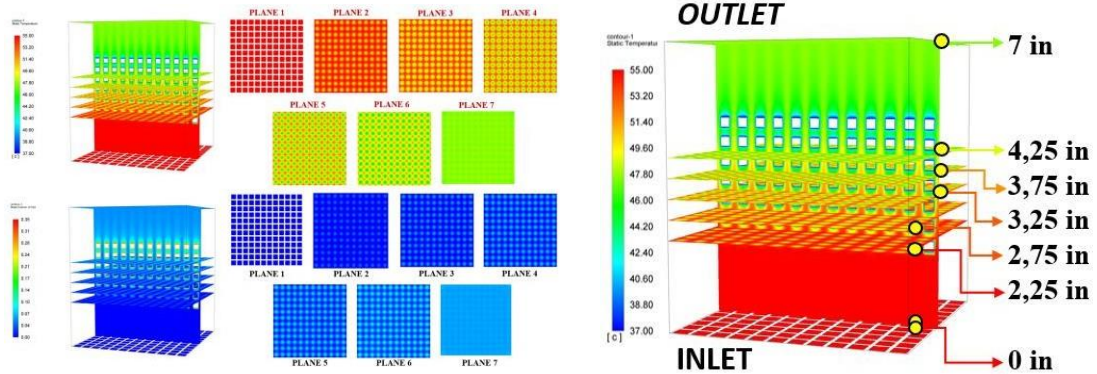


(c)

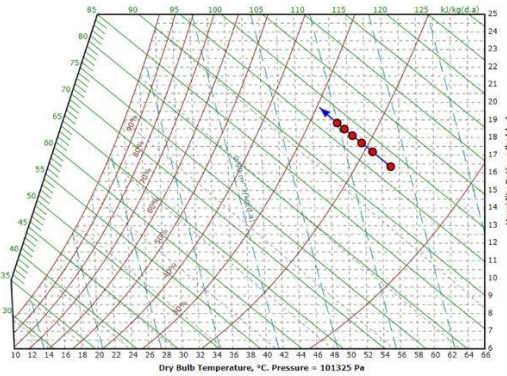
**Gambar 4.33** Grafik Elevasi Y fungsi waktu terhadap Moisture Content dengan Variasi Kecepatan (a)1,6 m/s, (b)2 m/s, dan (c)2.4 m/s *Perforated Plate Staggered*

#### 4.7 Analisa Distribusi Psychrometric Chart

Data input untuk *psychrometric chart* diperoleh dari hasil *running* pada *software* ANSYS Fluent 19.2 yang dari beberapa nilai *plane average* di sepanjang *drying chamber*. Berikut adalah posisi *plane* pengambilan data temperatur average beserta *relative humidity* pada *chamber* pengering batubara.

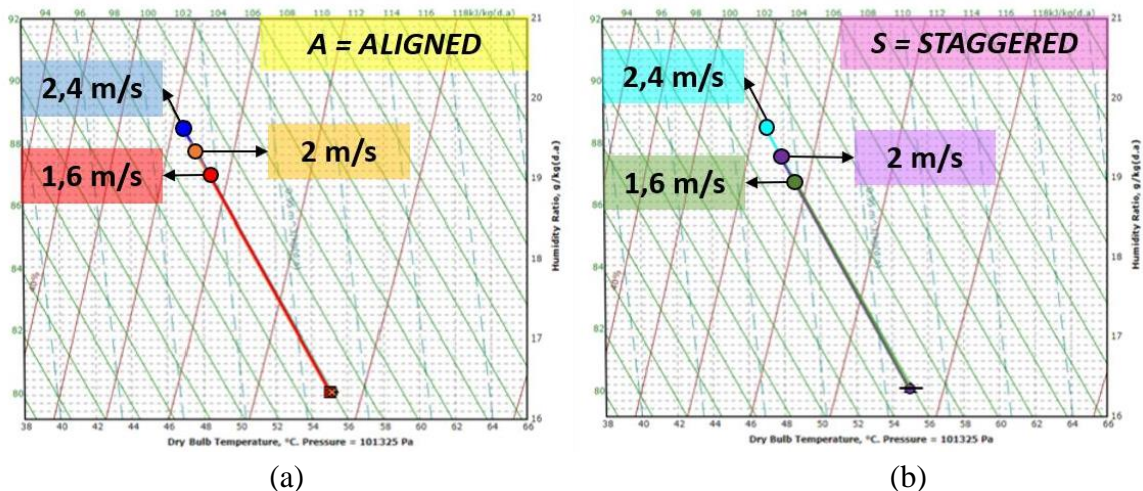


Gambar 4.34 Plane Average untuk Pengambilan Nilai Temperatur dan Relative Humidity



Gambar 4.35 Hasil Psychrometric Chart

#### 4.7.1 Analisa Psychrometric Chart pada Variasi Kecepatan Udara Pengering



Gambar 4.36 Psychrometric Chart Variasi Kecepatan Inlet pada Perforated Plate Tersusun Aligned dan Staggered

Berikut adalah proses yang terjadi dalam *psychrometric chart* pada ketiga variasi kecepatan dengan *perforated plate aligned* dan *staggered*.

- 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. Namun, peningkatannya tidak begitu signifikan karena jumlah batubara yang dilewati oleh udara pengering hanya sedikit.

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

Proses ini terjadi penyerapan kandungan air dari batubara oleh udara kering kembali. Terjadi juga penurunan temperatur juga diiringi peningkatan *moisture content* pada udara pengering.

➤ 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.

➤ 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.

➤ 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- 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. Disini peningkatan kandungan airnya tidak terlalu signifikan dikarenakan kemampuan udara pengering semakin berkurang untuk menyerap air.

Berdasarkan teori, kecepatan udara memengaruhi *Reynold number* serta koefisien perpindahan panas dan massa. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, maka semakin tinggi koefisien perpindahan massanya.

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times d}{\mu}$$

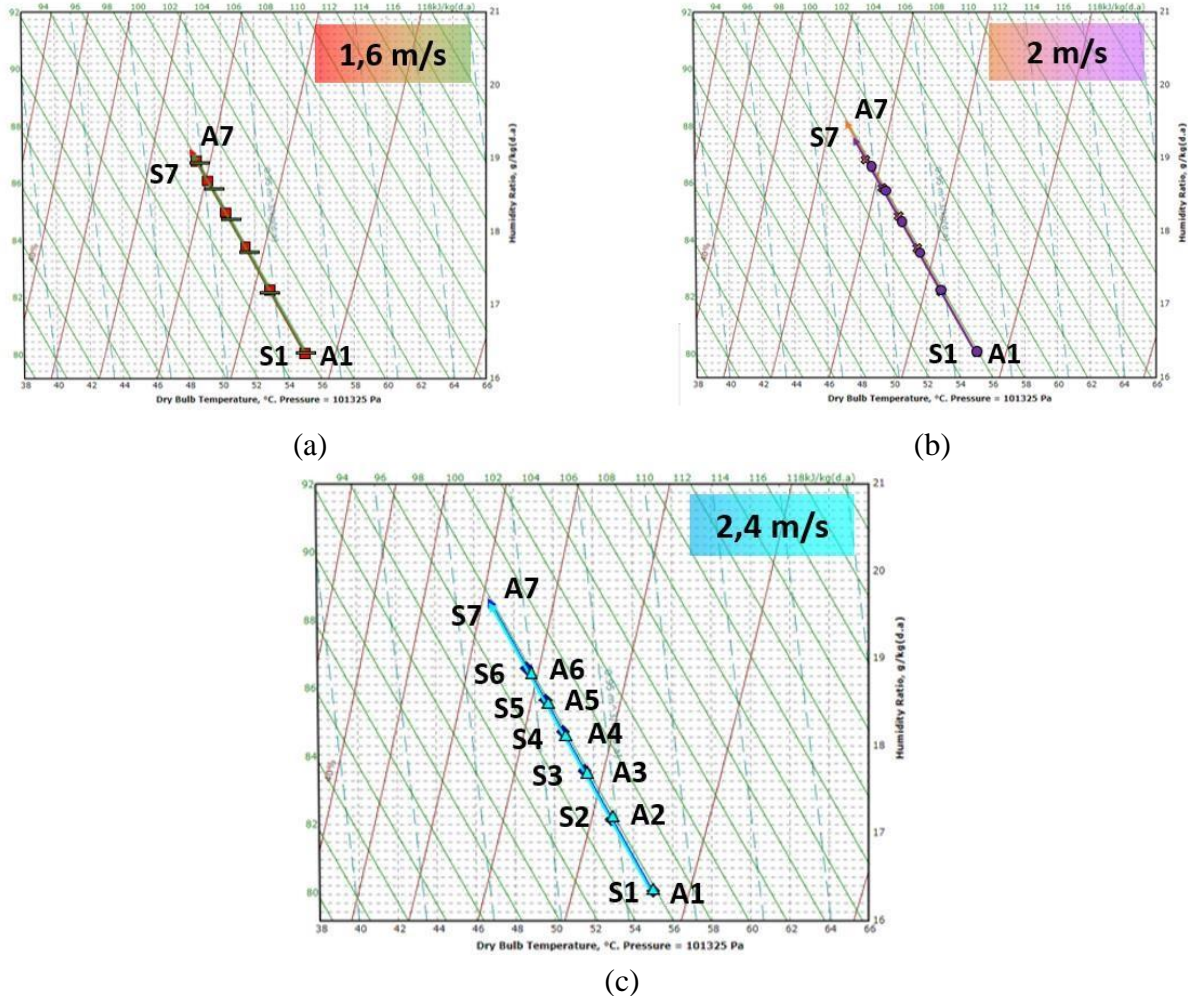
$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$$

$$h = \frac{\text{Nu} \times k}{d}$$

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

Kecepatan *air heater* 2,4 m/s memberikan nilai koefisien perpindahan massa yang besar sehingga memberikan laju perpindahan massa yang besar. Dengan kata lain, kecepatan *air heater* 2,4 m/s memiliki laju perpindahan panas sekaligus laju perpindahan massa yang paling besar. Sebaliknya kecepatan *air heater* 1,6 m/s memiliki laju perpindahan panas dan massa yang paling rendah

#### 4.7.2 Analisa Psychrometric Chart pada Variasi Susunan Lubang Perforated Plate



**Gambar 4.37** Psychrometric Chart Variasi Perforated Plate Tersusun Aligned dan Staggered pada Kecepatan Inlet 1,6 m/s, 2 m/s, dan 2,4 m/s

Keterangan:

$A_n$ : Posisi ke- $n$  dengan Perforated Plate Aligned

$S_n$ : Posisi ke- $n$  dengan Perforated Plate Staggered

Berikut adalah proses yang terjadi dalam psychrometric chart pada ketiga variasi kecepatan dengan perforated plate aligned dan staggered.

- 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. Namun, peningkatannya tidak begitu signifikan karena jumlah batubara yang dilewati oleh udara pengering hanya sedikit.

- Proses 2-3 (cooling dan humidifying)

Proses ini terjadi penyerapan kandungan air dari batubara oleh udara kering kembali. Terjadi juga penurunan temperatur juga diiringi peningkatan moisture content pada udara pengering.

- 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.

➤ 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.

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

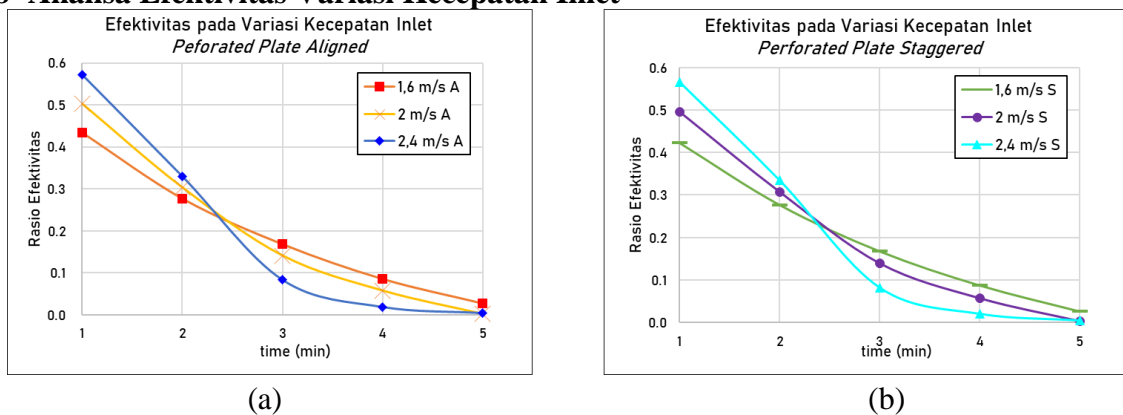
Pada proses ini terjadi penyerapan *moisture content* dari batubara oleh udara pengering. Sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *moisture content* pada udara yang sekaligus mengalami penurunan temperatur karena udara pengering bersentuhan dengan batubara. Namun, peningkatannya lebih kecil dibandingkan dengan proses- 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. Disini peningkatan kandungan airnya tidak terlalu signifikan dikarenakan kemampuan udara pengering semakin berkurang untuk menyerap air.

Dari ketiga gambar *psychrometric chart* yang ditunjukkan tersebut terlihat saling berimpit yang mana menandakan hampir sama grafiknya, kurang terlihat signifikan perbedaannya. Maka dari itu perbedaan peningkatan *humidity ratio* sangat tipis hampir tidak ada persamaan. Sehingga penggunaan *perforated plate* pada *fluidized bed coal dryer* tidak memiliki efek yang signifikan terhadap proses pengeringan suatu batubara.

#### 4.8 Analisa Efektivitas Variasi Kecepatan Inlet



**Gambar 4.38** Grafik Efektivitas terhadap Waktu

Berikut ini pada gambar 4.38 diatas adalah untuk mencari bagaimana efektivitas dari pengeringan dengan variasi kecepatan udara masuk dilakukan pencarian rasio dari laju pengeringan batubara dengan volume batubara dan di plot sesuai waktu sampai menit kelima. Dapat terlihat, untuk menit awal dengan kecepatan 2,4 m/s memiliki efektivitas tertinggi nilai rasionya, namun setelah menit ketiga semakin menurun dibawah kecepatan 2 dan 1,6 m/s, yang artinya efektifitasnya seiring bertambahnya waktu maka semakin menurun. Serta pada akhirnya mencapai ke titik yang sama pada menit kelima.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan analisis dari data yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Semakin tinggi kecepatan udara *inlet* maka jumlah *moisture content* yang diserap dari batubara semakin banyak dalam waktu yang sama sehingga yang memiliki pengeringan terbaik adalah pada kecepatan 2,4 m/s dengan *perforated plate aligned* yang mencapai *moisture content* senilai 0,30746(30,746%) dan laju pengeringan batubara semakin meningkat seiring dengan tinggi kecepatan udara masuk.
2. *Perforated plate* tidak memiliki pengaruh pada laju penurunan *moisture content* terhadap proses pengeringan batubara dengan waktu yang sama dibuktikan dengan *perforated plate staggered* dan *aligned* yang *moisture content*-nya mperbedaan yang kurang signifikan yaitu 0,30746(30,746%) dan 0,30754(30,754%).
3. Proses yang terjadi pada *psychrometric chart* adalah *cooling* dan *humidifying* yaitu penurunan temperatur dan peningkatan kandungan air pada sisi *inlet* ke *outlet*, diakibatkan udara pengering melewati batubara.

#### **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. Kedepannya diharapkan untuk membuat simulasi numerik secara transien agar hasil yang diperoleh lebih baik lagi.
3. Membuat pemodelan maupun *meshing* menggunakan dimensi dari alat eksperimen yang ada di laboratorium pendingin agar bisa dibandingkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Antony, Jibin dan M.B. Shyamkumar. (2016). Study on Sand Particles Drying in a Fluidized Bed Dryer using CFD. Research India Publications.
- Astagina. (2015). Studi Eksperimen Karakteristik Pengeringan Batubara terhadap Variasi Temperatur Pengeringan pada Swirling Fluidized Bed Coal Dryer. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Incropera, Frank P., D. P. Dewitt, T. L. Bergman, dan A. S. Lavine. (2005). Fundamental of Heat and Mass Transfer 6<sup>th</sup> Edition. John Wiley & Sons Inc.
- Jangam, S.V., Law, C. L., and Mujumdar A.S., (2010). Use of renewable source of energy for drying of FVF in Drying of Foods, Vegetables and Fruits, Vol. 1, National University of Singapore.
- Kurniawan, Andi. (2012) Studi Numerik Pengaruh Variasi Temperatur Air Heater terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara pada Fluidized bed Coal dryer dengan Tube Heater tersusun *Aligned*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Levy, Edward K., Nenad Sarunac, Harun Bilirgen, dan Hugo Caram. (2006). Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants. Energy Research Center. Lehigh University.
- Mak, C. (2007). Fine coal cleaning using an air dense medium fluidized bed. University of Alberta Canada.
- Moran, M. J. & Shapiro, H. N., (2006). Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Mujumdar, A.S dan A.S. Menon. (1995). Handbook of Industrial Drying, 2nd Edition. New York.
- Putro, Widiandoko K. (2008). Analisa Energi dan Beban Thermal pada Gedung Dekanat Fakultas Teknik Universitas Indonesia. <https://lib.ui.ac.id/file?file=digital/123753-R220850-Analisa%20energi-Literatur.pdf>
- Riza, Hammam, dkk. (2021). Buku Outlook Energi Indonesia 2021. PPIPE dan BPPT.
- Schafer. (2014). Perforated metal Made to Measure – Individual and Fast. Schafer Lochbleche GmbH & Co. KG.
- Sofianita, Nuha. (2021). Studi Numerik Pengaruh Variasi Temperatur dan Kecepatan Fluidisasi Coal Drying terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara pada Fluidized Bed Coal Dryer dengan Tube Heater Tersusun *Staggered*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Suharyanti, Sadmoko Hesti Pambudi, dkk. (2019). Buku Outlook Energi Indonesia 2019.

Dewan Energi Nasional.

Widarwis, Al Velian Suci Hadi. (2018). Studi Eksperimen Pengaruh Diameter Perforated Plate (5 mm dan 10 mm) dan Kecepatan Udara Dibawah Fluidisasi Terhadap Kinerja Coal Dryer. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Yohana, E. dkk. (2020). 3D Simulation on Convective Drying Process for Cylindrical Tea Particle Using CFD Software to Analyze the Heat and Mass Transfer Phenomena. AIP Conference Proceedings.



# 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	
<b>Proximate Analysis</b>						
- 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
<b>Total Sulfur</b>	% wt	0.19	0.25	0.29	0.30	ASTM D 4239-14e2
<b>Gross Calorific Value</b>	Kcal/Kg	4248	5627	6551	6855	ASTM D 5865-13

<b>Ultimate Analysis:</b>		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
<b>Size Distribution</b>						
+ 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				

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

<b>Ash Fusion Temperature</b>		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

Kecepatan 1,6 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned							
T inlet	T coal awal	fm coal awal	h	k	rho coal	cp coal	Dab
K	K		W/m <sup>2</sup> .K	W/m.K	kg/m <sup>3</sup>	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s
328	300	0.3500	71.9319	0.0454	1.01733	1110.41	2.88E-05
328	320.942	0.3315	6.55287	0.0454	1.00218	1107.36	2.88E-05
328	326.240	0.3198	2.90296	0.0454	0.99922	1105.43	2.88E-05
328	327.563	0.3128	1.09708	0.0454	0.99854	1104.87	2.88E-05
328	327.892	0.3092	0.40122	0.0454	0.99838	1104.72	2.88E-05
Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned							
T inlet	T coal awal	fm coal awal	h	k	rho coal	cp coal	Dab
K	K		W/m <sup>2</sup> .K	W/m.K	kg/m <sup>3</sup>	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s
328	300	0.3500	83.245	0.0454	1.0174	1110.45	2.88E-05
328	321.443	0.3286	6.94027	0.0454	1.00207	1106.95	2.88E-05
328	326.483	0.3158	2.29106	0.0454	0.99941	1104.84	2.88E-05
328	327.652	0.3099	0.76136	0.0454	0.99885	1104.28	2.88E-05
328	327.921	0.3075	0.02556	0.0454	0.99873	1104.15	2.88E-05
Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned							
T inlet	T coal awal	fm coal awal	h	k	rho coal	cp coal	Dab
K	K		W/m <sup>2</sup> .K	W/m.K	kg/m <sup>3</sup>	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s
328	300	0.3500	94.3996	0.0454	1.01748	1110.43	2.88E-05
328	321.807	0.3257	7.35124	0.0454	1.00209	1106.47	2.88E-05
328	326.649	0.3119	1.39969	0.0454	0.9997	1104.20	2.88E-05
328	327.708	0.3084	0.29645	0.0454	0.99923	1103.62	2.88E-05
328	327.938	0.3076	0.06454	0.0454	0.99913	1103.49	2.88E-05
Kecepatan 1,6 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered							
T inlet	T coal awal	fm coal awal	h	k	rho coal	cp coal	Dab
K	K		W/m <sup>2</sup> .K	W/m.K	kg/m <sup>3</sup>	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s
328	300	0.3500	70.0574	0.0454	1.0179	1109.14	2.88E-05
328	320.710	0.3320	6.62852	0.0454	1.00299	1106.24	2.88E-05
328	326.121	0.3203	2.89302	0.0454	0.99995	1104.35	2.88E-05
328	327.519	0.3133	1.08229	0.0454	0.99923	1103.79	2.88E-05
328	327.877	0.3097	0.39216	0.0454	0.99905	1103.63	2.88E-05
Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered							
T inlet	T coal awal	fm coal awal	h	k	rho coal	cp coal	Dab
K	K		W/m <sup>2</sup> .K	W/m.K	kg/m <sup>3</sup>	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s
328	300	0.3500	82.1058	0.0454	1.018	1108.78	2.88E-05
328	321.206	0.3289	7.13329	0.0454	1.00309	1105.42	2.88E-05
328	326.371	0.3159	2.17792	0.0454	1.0004	1103.34	2.88E-05
328	327.612	0.3101	0.71209	0.0454	0.99981	1102.77	2.88E-05
328	327.909	0.3077	0.03125	0.0454	0.99967	1102.62	2.88E-05

**Tabel 2** Data Hasil Simulasi Fluent (*Continued*)

Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered							
T inlet	T coal awal	fm coal awal	h	k	rho coal	cp coal	Dab
K	K		W/m <sup>2</sup> .K	W/m.K	kg/m <sup>3</sup>	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s
328	300	0.3500	93.3128	0.0454	1.01813	1108.26	2.88E-05
328	321.608	0.3260	7.53317	0.0454	1.00332	1104.50	2.88E-05
328	326.560	0.3120	1.37818	0.0454	1.00093	1102.28	2.88E-05
328	327.679	0.3086	0.32272	0.0454	1.00044	1101.70	2.88E-05
328	327.930	0.3077	0.07237	0.0454	1.00033	1101.57	2.88E-05

**Tabel 3** Data Hasil Perhitungan

Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Aligned</i>								
$\alpha$	Le	hm	n"A	nA	time	$\Delta$ mH <sub>2</sub> O	YH <sub>2</sub> O coal awal	YH <sub>2</sub> O coal akhir
m <sup>2</sup> /s		m/s	kg/m <sup>2</sup> .s	kg/s				
4.01892E-05	1.39546	0.05093	0.00042	9.25308E-05	60	0.01851	0.35	0.33149
4.09091E-05	1.42046	0.00467	0.00027	5.83979E-05	60	0.01168	0.33149	0.31981
4.11021E-05	1.42716	0.00207	0.00016	3.52881E-05	60	0.00706	0.31981	0.31276
4.11510E-05	1.42885	0.00078	6.6E-05	1.43462E-05	60	0.00287	0.31276	0.30989
4.11632E-05	1.42928	0.00029	2.5E-05	5.34147E-06	60	0.00107	0.30989	0.30882
Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Aligned</i>								
$\alpha$	Le	hm	n"A	nA	time	$\Delta$ mH <sub>2</sub> O	YH <sub>2</sub> O coal awal	YH <sub>2</sub> O coal akhir
m <sup>2</sup> /s		m/s	kg/m <sup>2</sup> .s	kg/s				
4.01851E-05	1.39532	0.05894	0.00049	0.000107080	60	0.02142	0.35	0.32858
4.09290E-05	1.42114	0.00494	0.00029	6.37838E-05	60	0.01276	0.32858	0.31583
4.11160E-05	1.42764	0.00163	0.00013	2.82311E-05	60	0.00565	0.31583	0.31018
4.11600E-05	1.42917	0.00054	4.6E-05	1.00047E-05	60	0.00200	0.31018	0.30818
4.11701E-05	1.42952	1.8E-05	1.6E-06	3.40814E-07	60	6.8E-05	0.30818	0.30811
Kecepatan 2,4 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Aligned</i>								
$\alpha$	Le	hm	n"A	nA	time	$\Delta$ mH <sub>2</sub> O	YH <sub>2</sub> O coal awal	YH <sub>2</sub> O coal akhir
m <sup>2</sup> /s		m/s	kg/m <sup>2</sup> .s	kg/s				
4.01829E-05	1.39524	0.06684	0.00056	0.000121426	60	0.02429	0.35	0.32571
4.09457E-05	1.42172	0.00524	0.00032	6.90765E-05	60	0.01382	0.32571	0.31190
4.11282E-05	1.42806	0.00100	8.0E-05	1.74077E-05	60	0.00348	0.31190	0.30842
4.11690E-05	1.42948	0.00021	1.8E-05	3.90767E-06	60	0.00078	0.30842	0.30764
4.11779E-05	1.42979	4.6E-05	4.0E-06	8.61511E-07	60	0.00017	0.30764	0.30746
Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Staggered</i>								
$\alpha$	Le	hm	n"A	nA	time	$\Delta$ mH <sub>2</sub> O	YH <sub>2</sub> O coal awal	YH <sub>2</sub> O coal akhir
m <sup>2</sup> /s		m/s	kg/m <sup>2</sup> .s	kg/s				
4.02127E-05	1.39627	0.04962	0.00041	9.01369E-05	60	0.01803	0.35	0.33197
4.09175E-05	1.42075	0.00472	0.00027	5.82368E-05	60	0.01165	0.33197	0.32033
4.11120E-05	1.42750	0.00206	0.00016	3.4939E-05	60	0.00699	0.32033	0.31334
4.11629E-05	1.42927	0.00077	6.5E-05	1.41198E-05	60	0.00282	0.31334	0.31051
4.11762E-05	1.42973	0.00028	2.4E-05	5.21713E-06	60	0.00104	0.31051	0.30947
Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Staggered</i>								
$\alpha$	Le	hm	n"A	nA	time	$\Delta$ mH <sub>2</sub> O	YH <sub>2</sub> O coal awal	YH <sub>2</sub> O coal akhir
m <sup>2</sup> /s		m/s	kg/m <sup>2</sup> .s	kg/s				
4.02220E-05	1.39660	0.05815	0.00049	0.000105647	60	0.02113	0.35	0.32887
4.09436E-05	1.42165	0.00508	0.00030	6.46249E-05	60	0.01292	0.32887	0.31595
4.11312E-05	1.42817	0.00170	0.00012	2.66738E-05	60	0.00533	0.31595	0.31061
4.11770E-05	1.42976	0.00065	4.3E-05	9.33857E-06	60	0.00187	0.31061	0.30874
4.11880E-05	1.43014	3.7E-05	1.9E-06	4.16530E-07	60	8.3E-05	0.30874	0.30866

**Tabel 3** Data Hasil Perhitungan (*Continued*)

Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered								
$\alpha$	Le	hm	n"A	nA	time	$\Delta$ mH <sub>2</sub> O	YH <sub>2</sub> O coal awal	YH <sub>2</sub> O coal akhir
m <sup>2</sup> /s		m/s	kg/m <sup>2</sup> .s	kg/s				
4.02355E-05	1.39706	0.06610	0.00055	0.000120080	60	0.02402	0.35	0.32598
4.09683E-05	1.42251	0.00537	0.00032	6.99532E-05	60	0.01399	0.32598	0.31199
4.11492E-05	1.42879	0.00105	7.8E-05	1.70591E-05	60	0.00341	0.31199	0.30858
4.11909E-05	1.43024	0.00023	2.0E-05	4.24794E-06	60	0.00085	0.30858	0.30773
4.12002E-05	1.43056	5.2E-05	4.4E-06	9.65640E-07	60	0.00019	0.30773	0.30754

**Tabel 4** Data Nilai Distribusi Temperatur

Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003
2	53.7110	53.7072	53.7028	53.7039	53.6993	53.7133	53.7091	53.7041	53.7002	53.6955
3	52.4928	52.4842	52.4753	52.4825	52.4719	52.4978	52.4892	52.4801	52.4722	52.4638
4	50.7299	50.6966	50.7078	50.6938	50.6794	50.7404	50.7068	50.7176	50.7053	50.6922
5	48.7806	48.7305	48.8468	48.8288	48.8070	48.7984	48.7468	48.7633	48.8458	48.8261
6	47.8914	47.8639	47.8543	47.8425	47.8210	47.9063	47.8800	47.8688	47.8590	47.8385
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003
2	53.6984	53.6997	53.7041	53.6948	53.6945	53.6965	53.6971	53.7021	53.6928	53.6922
3	52.4661	52.4735	52.4804	52.4678	52.4636	52.4609	52.4681	52.4760	52.4625	52.4577
4	50.6881	50.6987	50.7076	50.8176	50.8126	50.6994	50.7082	50.7190	50.7288	50.7372
5	48.7088	48.7266	48.8655	48.7223	48.7778	48.7297	48.7461	48.7673	48.7762	48.7967
6	47.8400	47.8549	47.8707	47.8686	47.8851	47.8192	47.8347	47.8519	47.8505	47.8662
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	52.9222	52.9477	52.9358	52.8569	52.8757					
2	52.9279	52.8546	52.9266	52.8517	52.8723					
3	52.9563	52.8636	52.9579	52.8593	52.8737					
4	52.9472	52.8537	52.9506	52.8497	52.8645					
5	52.9417	52.8611	52.9546	52.8550	52.8652					
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003
2	53.2000	53.1959	53.1949	53.1910	53.3512	51.9751	51.9675	52.1715	52.1828	52.1919
3	51.9932	51.9851	51.9805	51.9728	52.1239	50.7021	50.8311	50.8503	50.8690	50.8870
4	50.4311	50.4199	50.4109	50.3975	50.3825	49.3326	49.3062	49.2781	49.2475	49.2153
5	48.5575	48.5402	48.5263	48.5071	48.4827	47.3663	47.3284	47.2950	47.2528	47.2076
6	47.6872	47.6792	47.6736	47.6611	47.6433	47.3054	47.2938	47.2805	47.2637	47.2336
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003	55.0003
2	53.3310	53.3227	53.1336	53.1298	53.1257	53.3318	53.3233	53.1316	53.1287	53.1242
3	52.1052	52.1018	51.9189	51.9099	51.8967	52.1073	52.1035	51.9145	51.9065	51.8930
4	50.4086	50.3811	50.3697	50.3531	50.3314	50.3992	50.3719	50.3604	50.3448	50.3227
5	48.5713	48.5344	48.5151	48.4886	48.4500	48.5542	48.5177	48.4987	48.4730	48.4341
6	47.7207	47.6993	47.6933	47.6787	47.6543	47.7086	47.6875	47.6817	47.6676	47.6432
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	52.3135	52.3071	52.3037	52.2967	52.2904					
2	52.2998	52.2912	52.2879	52.2818	52.3488					
3	52.2568	52.2478	52.2424	52.2812	52.2779					
4	52.2958	52.2881	52.2846	52.2774	52.2747					
5	52.2960	52.2879	52.2829	52.2767	52.2757					

**Tabel 4** Data Nilai Distribusi Temperatur (*Continued*)

Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005
2	53.8902	53.8863	53.8822	53.8811	53.8748	53.8943	53.8898	53.8846	53.8798	53.8731
3	52.7956	52.7859	52.7756	52.7767	52.7644	52.8024	52.7928	52.7820	52.7711	52.7572
4	51.1649	51.1236	51.1379	51.1201	51.1016	51.1779	51.1369	51.1507	51.1346	51.1159
5	49.3192	49.2527	49.3722	49.3480	49.3173	49.3415	49.2751	49.2979	49.3701	49.3407
6	48.3743	48.3524	48.3401	48.3247	48.2906	48.3982	48.3786	48.3648	48.3497	48.3162
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005
2	53.8741	53.8804	53.8839	53.8811	53.8762	53.8725	53.8781	53.8819	53.8787	53.8740
3	52.7603	52.7731	52.7804	52.7721	52.7632	52.7552	52.7676	52.7755	52.7661	52.7572
4	51.1082	51.1275	51.1381	51.2472	51.2362	51.1216	51.1393	51.1514	51.1681	51.1751
5	49.2199	49.2524	49.3952	49.2526	49.3190	49.2445	49.2756	49.2987	49.3211	49.3407
6	48.3173	48.3499	48.3661	48.3767	48.3910	48.2894	48.3228	48.3397	48.3501	48.3648
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	53.2393	53.2268	53.2330	53.3106	53.2994					
2	53.2445	53.2302	53.2351	53.3140	53.3075					
3	53.2524	53.2375	53.2433	53.3202	53.3140					
4	53.2536	53.2366	53.2437	53.3041	53.2999					
5	53.2573	53.2415	53.3140	53.3048	53.2921					
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0004	55.0004	55.0004	55.0004	55.0004
2	53.3913	53.3864	53.3850	53.3809	53.5233	52.1329	52.1247	52.3098	52.3217	52.3314
3	52.2906	52.2812	52.2762	52.2676	52.4054	50.9208	51.0336	51.0521	51.0721	51.0913
4	50.8615	50.8478	50.8382	50.8232	50.8077	49.6229	49.5951	49.5647	49.5346	49.4994
5	49.1129	49.0916	49.0751	49.0513	49.0217	47.7411	47.7002	47.6615	47.6178	47.5668
6	48.2048	48.1934	48.1856	48.1696	48.1458	47.7074	47.6943	47.6784	47.6585	47.6218
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005	55.0005
2	53.5025	53.5002	53.3240	53.3202	53.3148	53.5031	53.5007	53.3223	53.3192	53.3132
3	52.3889	52.3924	52.2129	52.2038	52.1894	52.3905	52.3941	52.2087	52.2005	52.1854
4	50.8175	50.7960	50.7821	50.7631	50.7365	50.8081	50.7864	50.7726	50.7543	50.7271
5	49.1024	49.0670	49.0414	49.0071	48.9581	49.0836	49.0483	49.0228	48.9892	48.9397
6	48.2454	48.2244	48.2125	48.1912	48.1517	48.2290	48.2083	48.1965	48.1754	48.1360
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	52.6360	52.6266	52.6218	52.6182	52.6156					
2	52.6264	52.6173	52.6143	52.6087	52.6589					
3	52.5777	52.5687	52.5637	52.6079	52.6061					
4	52.6232	52.6153	52.6121	52.6050	52.6038					
5	52.6238	52.6147	52.6100	52.6041	52.6036					

**Tabel 4** Data Nilai Distribusi Temperatur (*Continued*)

Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007
2	54.0128	54.0079	54.0032	54.0006	53.9961	54.0178	54.0122	54.0060	54.0008	53.9956
3	53.0190	53.0083	52.9975	52.9951	52.9809	53.0269	53.0162	53.0044	52.9922	52.9751
4	51.4994	51.4497	51.4663	51.4456	51.4251	51.5132	51.4646	51.4807	51.4616	51.4398
5	49.7424	49.6623	49.7827	49.7530	49.7191	49.7673	49.6884	49.7155	49.7789	49.7455
6	48.7447	48.7320	48.7169	48.6972	48.6561	48.7762	48.7655	48.7500	48.7293	48.6890
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007
2	53.9957	54.0025	54.0051	54.0048	54.0007	53.9945	54.0001	54.0032	54.0027	53.9988
3	52.9785	52.9949	53.0027	52.9955	52.9844	52.9735	52.9892	52.9975	52.9897	52.9787
4	51.4308	51.4550	51.4675	51.5695	51.5563	51.4456	51.4682	51.4821	51.5023	51.5120
5	49.6258	49.6655	49.8093	49.6642	49.7446	49.6537	49.6916	49.7167	49.7449	49.7678
6	48.6905	48.7340	48.7520	48.7695	48.7870	48.6565	48.7011	48.7190	48.7369	48.7546
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	53.5353	53.5527	53.5454	53.4932	53.5077					
2	53.5420	53.4953	53.5477	53.4880	53.5036					
3	53.5484	53.4897	53.5545	53.4839	53.5002					
4	53.5426	53.4836	53.5494	53.4784	53.4939					
5	53.5332	53.4772	53.5428	53.4703	53.4841					
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0005	55.0006	55.0005	55.0005	55.0005
2	53.5823	53.5762	53.5763	53.5728	53.7007	52.2641	52.2549	52.4291	52.4426	52.4537
3	52.5737	52.5623	52.5588	52.5509	52.6807	51.1002	51.1960	51.2208	51.2436	51.2647
4	51.2489	51.2337	51.2244	51.2095	51.1918	49.8629	49.8345	49.8034	49.7674	49.7256
5	49.6038	49.5795	49.5607	49.5347	49.5003	48.0513	48.0083	47.9705	47.9201	47.8602
6	48.6676	48.6531	48.6434	48.6253	48.5924	48.0395	48.0249	48.0105	47.9879	47.9410
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007	55.0007
2	53.6717	53.6818	53.5191	53.5150	53.5107	53.6690	53.6818	53.5171	53.5138	53.5087
3	52.6530	52.6701	52.4930	52.4827	52.4688	52.6507	52.6712	52.4884	52.4790	52.4643
4	51.1808	51.1725	51.1560	51.1343	51.1065	51.1682	51.1618	51.1457	51.1249	51.0959
5	49.5611	49.5366	49.5046	49.4645	49.4110	49.5383	49.5157	49.4838	49.4446	49.3900
6	48.6970	48.6838	48.6656	48.6377	48.5861	48.6740	48.6631	48.6449	48.6177	48.5657
Distribusi Temperatur(°C) - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	52.9176	52.9020	52.9071	52.8898	52.8913					
2	52.9274	52.9187	52.9172	52.9095	52.9406					
3	52.8696	52.8571	52.8597	52.9120	52.9073					
4	52.9266	52.9192	52.9164	52.9091	52.9041					
5	52.9266	52.9197	52.9156	52.9098	52.9070					



**Tabel 5** Data Nilai Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O

Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XY</i>										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649
3	0.01682	0.01682	0.01683	0.01682	0.01683	0.01682	0.01682	0.01683	0.01683	0.01683
4	0.01730	0.01731	0.01731	0.01731	0.01732	0.01730	0.01731	0.01731	0.01731	0.01731
5	0.01784	0.01785	0.01782	0.01782	0.01783	0.01783	0.01785	0.01784	0.01782	0.01782
6	0.01808	0.01809	0.01809	0.01809	0.01810	0.01807	0.01808	0.01808	0.01809	0.01809
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane YZ</i>										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649	0.01649
3	0.01683	0.01683	0.01683	0.01683	0.01683	0.01683	0.01683	0.01683	0.01683	0.01683
4	0.01732	0.01731	0.01731	0.01728	0.01728	0.01731	0.01731	0.01731	0.01730	0.01730
5	0.01786	0.01785	0.01781	0.01785	0.01784	0.01785	0.01785	0.01784	0.01784	0.01783
6	0.01809	0.01809	0.01808	0.01808	0.01808	0.01810	0.01809	0.01809	0.01809	0.01809
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XZ</i>										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	0.016937	0.016926	0.016929	0.016960	0.016953					
2	0.016933	0.016964	0.016933	0.016964	0.016957					
3	0.016922	0.016960	0.016922	0.016960	0.016957					
4	0.016926	0.016964	0.016926	0.016964	0.016960					
5	0.016929	0.016960	0.016926	0.016960	0.016957					
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XY</i>										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01663	0.01663	0.01663	0.01663	0.01659	0.01696	0.01697	0.01691	0.01691	0.01690
3	0.01696	0.01696	0.01696	0.01696	0.01692	0.01731	0.01728	0.01727	0.01727	0.01726
4	0.01739	0.01739	0.01739	0.01739	0.01740	0.01769	0.01769	0.01770	0.01771	0.01772
5	0.01790	0.01790	0.01791	0.01791	0.01792	0.01822	0.01823	0.01824	0.01825	0.01827
6	0.01813	0.01814	0.01814	0.01814	0.01815	0.01824	0.01824	0.01825	0.01825	0.01826
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane YZ</i>										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01659	0.01659	0.01665	0.01665	0.01665	0.01659	0.01659	0.01665	0.01665	0.01665
3	0.01693	0.01693	0.01698	0.01698	0.01698	0.01693	0.01693	0.01698	0.01698	0.01699
4	0.01739	0.01740	0.01740	0.01741	0.01741	0.01739	0.01740	0.01740	0.01741	0.01741
5	0.01789	0.01790	0.01791	0.01792	0.01793	0.01790	0.01791	0.01791	0.01792	0.01793
6	0.01813	0.01813	0.01813	0.01814	0.01814	0.01813	0.01813	0.01814	0.01814	0.01815
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 1,6 m/s <i>Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XZ</i>										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	0.016871	0.016872	0.016873	0.016875	0.016877					
2	0.016874	0.016877	0.016878	0.016879	0.016861					
3	0.016886	0.016889	0.016890	0.016880	0.016880					
4	0.016876	0.016878	0.016879	0.016881	0.016881					
5	0.016875	0.016878	0.016879	0.016881	0.016881					

**Tabel 5** Data Nilai Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O (*Continued*)

Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01650	0.01650	0.01650	0.01650	0.01651	0.01650	0.01650	0.01650	0.01651	0.01651
3	0.01686	0.01687	0.01687	0.01687	0.01687	0.01686	0.01686	0.01687	0.01687	0.01688
4	0.01740	0.01741	0.01741	0.01742	0.01742	0.01740	0.01741	0.01741	0.01741	0.01742
5	0.01801	0.01803	0.01799	0.01800	0.01801	0.01800	0.01802	0.01802	0.01799	0.01800
6	0.01832	0.01833	0.01833	0.01834	0.01835	0.01831	0.01832	0.01832	0.01833	0.01834
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01651	0.01651	0.01650	0.01650	0.01651	0.01651	0.01651	0.01650	0.01651	0.01651
3	0.01687	0.01687	0.01687	0.01687	0.01687	0.01688	0.01687	0.01687	0.01687	0.01688
4	0.01742	0.01741	0.01741	0.01737	0.01738	0.01742	0.01741	0.01741	0.01740	0.01740
5	0.01804	0.01803	0.01798	0.01803	0.01801	0.01803	0.01802	0.01802	0.01801	0.01800
6	0.01834	0.01833	0.01832	0.01832	0.01831	0.01835	0.01834	0.01833	0.01833	0.01832
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Aligned</i> - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	0.0168215	0.0168131	0.0168170	0.0168430	0.0168368					
2	0.0168196	0.0168438	0.0168200	0.0168447	0.0168379					
3	0.0168102	0.0168408	0.0168097	0.0168422	0.0168375					
4	0.0168132	0.0168441	0.0168121	0.0168454	0.0168405					
5	0.0168150	0.0168416	0.0168108	0.0168436	0.0168403					
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01666	0.01667	0.01667	0.01667	0.01662	0.01710	0.01708	0.01702	0.01702	0.01702
3	0.01703	0.01703	0.01703	0.01704	0.01699	0.01748	0.01744	0.01744	0.01743	0.01743
4	0.01750	0.01751	0.01751	0.01751	0.01752	0.01791	0.01792	0.01793	0.01794	0.01795
5	0.01823	0.01808	0.01809	0.01810	0.01811	0.01853	0.01854	0.01855	0.01857	0.01859
6	0.01838	0.01838	0.01838	0.01839	0.01840	0.01854	0.01854	0.01855	0.01856	0.01857
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01659	0.01659	0.01662	0.01696	0.01667	0.01659	0.01659	0.01662	0.01696	0.01667
3	0.01696	0.01696	0.01702	0.01704	0.01703	0.01696	0.01696	0.01702	0.01704	0.01703
4	0.01731	0.01745	0.01745	0.01746	0.01745	0.01731	0.01745	0.01745	0.01745	0.01745
5	0.01813	0.01812	0.01813	0.01815	0.01814	0.01813	0.01813	0.01813	0.01809	0.01814
6	0.01842	0.01843	0.01843	0.01843	0.01843	0.01843	0.01843	0.01843	0.01843	0.01843
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2 m/s <i>Perforated Plate</i> Tersusun <i>Staggered</i> - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	0.0169227	0.0169246	0.0169256	0.0169256	0.0169256					
2	0.0169246	0.0169256	0.0169256	0.0169256	0.0168135					
3	0.0169324	0.0169472	0.0169401	0.0169256	0.0169256					
4	0.0169256	0.0169256	0.0169256	0.0169256	0.0169121					
5	0.0169256	0.0169256	0.0169256	0.0169121	0.0169121					

**Tabel 5** Data Nilai Distribusi Fraksi Massa H<sub>2</sub>O (*Continued*)

Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01651	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652
3	0.01699	0.01690	0.01672	0.01691	0.01691	0.01689	0.01860	0.01673	0.01862	0.01691
4	0.01765	0.01751	0.01750	0.01749	0.01751	0.01761	0.01749	0.01749	0.01750	0.01652
5	0.01817	0.01820	0.01815	0.01816	0.01817	0.01815	0.01819	0.01817	0.01815	0.01816
6	0.01855	0.01856	0.01856	0.01857	0.01858	0.01852	0.01854	0.01855	0.01856	0.01857
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652	0.01652
3	0.01691	0.01691	0.01691	0.01691	0.01691	0.01692	0.01691	0.01691	0.01862	0.01691
4	0.01751	0.01749	0.01750	0.01746	0.01746	0.01749	0.01750	0.01749	0.01749	0.01748
5	0.01821	0.01823	0.01814	0.01820	0.01817	0.01820	0.01819	0.01817	0.01817	0.01815
6	0.01852	0.01856	0.01855	0.01854	0.01815	0.01858	0.01857	0.01856	0.01855	0.01855
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Aligned - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	0.016698	0.016695	0.016695	0.016718	0.016710					
2	0.016698	0.016714	0.016695	0.016718	0.016714					
3	0.016695	0.016718	0.016695	0.016722	0.016714					
4	0.016698	0.016722	0.016695	0.016722	0.016718					
5	0.016702	0.016722	0.016698	0.016725	0.016722					
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XY										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01668	0.01668	0.01668	0.01669	0.01664	0.01719	0.01720	0.01674	0.01936	0.01712
3	0.01707	0.01708	0.01708	0.01708	0.01703	0.01764	0.01760	0.01759	0.01759	0.01758
4	0.01757	0.01759	0.01759	0.01760	0.01761	0.01812	0.01813	0.01840	0.01815	0.01817
5	0.01825	0.01823	0.01824	0.01825	0.01826	0.01882	0.01884	0.01885	0.01887	0.01891
6	0.01858	0.01859	0.01859	0.01860	0.01861	0.01882	0.01883	0.01884	0.01884	0.01889
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane YZ										
Posisi	Plane 1					Plane 2				
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5
1	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614	0.01614
2	0.01665	0.01664	0.01671	0.01671	0.01671	0.01665	0.01664	0.01671	0.01671	0.01671
3	0.01695	0.01703	0.01710	0.01711	0.01711	0.01695	0.01703	0.01710	0.01711	0.01711
4	0.01761	0.01761	0.01762	0.01763	0.01764	0.01761	0.01762	0.01762	0.01763	0.01764
5	0.01824	0.01824	0.01826	0.01827	0.01829	0.01824	0.01825	0.01827	0.01828	0.01830
6	0.01857	0.01858	0.01858	0.01859	0.01861	0.01858	0.01858	0.01859	0.01860	0.01862
Distribusi Fraksi Massa H <sub>2</sub> O - Kecepatan 2,4 m/s Perforated Plate Tersusun Staggered - Plane XZ										
Posisi	X1	X2	X3	X4	X5					
1	0.016937	0.016945	0.016941	0.016949	0.016949					
2	0.016933	0.016937	0.016937	0.016941	0.016929					
3	0.016957	0.016960	0.016960	0.016941	0.016941					
4	0.016933	0.016937	0.016937	0.016941	0.016945					
5	0.016933	0.016937	0.016937	0.016941	0.016941					

**Tabel 6** Data *Psychrometric Chart*  
*Perforated Plate Tersusun Aligned*

<i>Perforated Plate Tersusun Aligned</i>						
Posisi	1,6 m/s		2 m/s		2,4 m/s	
	Temperatur(°C)	RH (%)	Temperatur(°C)	RH (%)	Temperatur(°C)	RH (%)
1	55	16.4	55	16.4	55	16.4
2	52.88	19.09	52.90	19.06	52.91	19.04
3	51.35	21.27	51.44	21.14	51.50	21.05
4	50.17	23.13	50.32	22.88	50.43	22.71
5	49.12	24.93	49.34	24.54	49.49	24.27
6	48.33	26.35	48.43	26.17	48.63	25.80
7	48.14	26.70	47.05	28.85	46.58	29.82
<i>Perforated Plate Tersusun Staggered</i>						
Posisi	1,6 m/s		2 m/s		2,4 m/s	
	Temperatur(°C)	RH (%)	Temperatur(°C)	RH (%)	Temperatur(°C)	RH (%)
1	55	16.4	55	16.4	55	16.4
2	52.92	19.03	52.91	19.04	52.90	19.06
3	51.55	20.98	51.60	20.90	51.63	20.86
4	50.39	22.77	50.50	22.59	50.57	22.48
5	49.37	24.48	49.54	24.20	49.64	24.01
6	48.43	26.16	48.66	25.75	48.81	25.48
7	48.25	26.50	47.56	27.83	46.76	29.55

**Tabel 7** Data *Moisture Content* per Elevasi Y

1,6 ALIGNED	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	AVERAGE
0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
1	0.331376	0.332643	0.333731	0.334598	0.335308	0.335925	0.33393
2	0.318839	0.320935	0.32274	0.324888	0.326036	0.326379	0.323303
2 ALIGNED	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	
0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
1	0.326855	0.328469	0.32979	0.332066	0.332845	0.333127	0.330525
2	0.313118	0.315675	0.317766	0.321404	0.322635	0.322965	0.318927
2,4 ALIGNED	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	
0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
1	0.323638	0.325568	0.327087	0.329635	0.330502	0.330705	0.327856
2	0.308702	0.311707	0.31409	0.318109	0.319454	0.320194	0.315376
1,6 STAGGERED	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	
0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
1	0.331188	0.332908	0.333935	0.334711	0.335402	0.335963	0.334018
2	0.319107	0.321918	0.323581	0.324851	0.325961	0.32689	0.323718
2 STAGGERED	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	
0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
1	0.32799	0.330062	0.331214	0.332098	0.332836	0.333466	0.331278
2	0.314608	0.317916	0.319753	0.321163	0.322339	0.323345	0.319854
2,4 STAGGERED	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	
0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
1	0.324924	0.327339	0.328628	0.329604	0.330408	0.331077	0.328663
2	0.310391	0.314182	0.316198	0.317726	0.318986	0.320038	0.316253

## BIODATA PENULIS



Annisa Firdaus lahir di Lamongan pada tanggal 30 September 2000. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Riwayat Pendidikan penulis yaitu, penulis sempat belajar di TK Al-Lathifiyah III (2005-2007), MI Ma'arif NU Sunan Drajat (2007-2013), SMPN 1 Lamongan (2013-2015), SMAN 2 Lamongan (2015-2018), dan ke jenjang sarjana di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS pada tahun 2018 dengan NRP 0211184000005.

Penulis aktif dalam berkegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Tercatat dalam berorganisasi, penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin ITS pada tahun 2019 sebagai Staf Departemen Kewirausahaan dan pada tahun 2020 sebagai Kabiro Fundraising Departemen Kewirausahaan.

Untuk kegiatan akademik penulis tercatat sebagai Asisten Praktikum mata Mekanika Fluida Dasar I tahun 2020 serta Mekanika Fluida Dasar II tahun 2021, dan Asisten Praktikum mata kuliah Perpindahan Panas pada tahun 2021. Untuk kegiatan lainnya penulis juga mengikuti kepanitian tingkat lain dari tingkat departemen sampai fakultas.

Apabila terdapat saran dan masukan penulis terkait Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email: [annisafirdaus9988@gmail.com](mailto:annisafirdaus9988@gmail.com)