

TUGAS AKHIR - TM 184835

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN DAN JENIS BED PENGERINGAN PADA *COAL DRYER* TERHADAP KARATERISTIK PENGERINGAN BATUBARA

FEBRIANI SEKAR HADIASTUTI

NRP 02111840000054

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 - TM184730

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN DAN JENIS BED
PENGERINGAN PADA *COAL DRYER* TERHADAP KARATERISTIK
PENGERINGAN BATUBARA**

FEBRIANI SEKAR HADIASTUTI

NRP 0211184000054

Dosen Pembimbing

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

NIP 196505051990031005

Program Studi Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184730

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF COAL DRYING
LOAD VARIATIONS AND BED TYPES IN COAL DRYER**

FEBRIANI SEKAR HADIASTUTI

NRP 02111840000054

Supervisor

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

NIP 196505051990031005

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN DAN JENIS BED PENGERINGAN PADA *COAL DRYER* TERHADAP KARATERISTIK PENGERINGAN BATUBARA

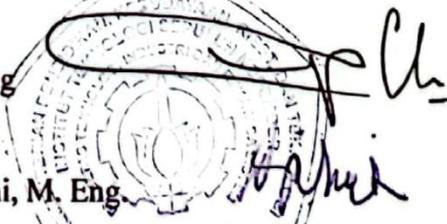
TUGAS AKHIR

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 : **Febriani Sekar Hadiastuti**

NRP. 0211184000054

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- | | | |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M. Eng |  | Pembimbing |
| 2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M. Eng |  | Penguji |
| 3. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. |  | Penguji |

SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF COAL DRYING LOAD VARIATIONS AND BED TYPES IN COAL DRYER

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
For obtaining a degree of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial System
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **Febriani Sekar Hadiastuti**

NRP. 0211184000054

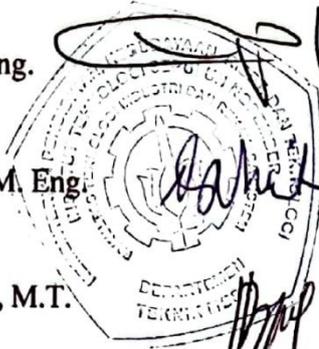
Approved by Final Project Examiner Team :

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



Advisor

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



Examiner

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



Examiner

SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Febriani Sekar Hadiastuti / 02111840000054

Departemen : S-1 Teknik Mesin

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

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Eksperimen Karakteristik Pengeringan Batubara terhadap Variasi Jenis Bed dan Kecepatan Udara Pengering” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan 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. Eng Ir. Prabowo, M.Eng.)

NIP. 196505051990031005

Mahasiswa,



(Febriani Sekar Hadiastuti)

NRP. 02111840000054

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Febriani Sekar Hadiastuti / 021118400001054
Department : Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Prof. Dr. Eng Ir. Prabowo, M.Eng. / 196505051990031005

hereby declare that the Final Project with the title of “Experimental Study of Coal Drying Characteristics on Bed Types and Drying Air Speed Variations” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 29 Juli 2022

Acknowledged

Advisor



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

Student,



(Febriani Sekar Hadiastuti)
NRP. 02111840000054

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN DAN JENIS BED PENGERINGAN PADA *COAL DRYER* TERHADAP KARATERISTIK PENGERINGAN BATUBARA

Nama Mahasiswa / NRP : Febriani Sekar Hadiastuti
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan pembangkit yang menggunakan bahan bakar utama berupa batubara. Batubara dengan nilai kalor yang tinggi akan membuat kerja boiler semakin maksimal dalam proses pembakarannya, sedangkan ketersediaan batubara kebanyakan memiliki nilai kalor rendah. Untuk meningkatkan nilai kalor batubara perlu dilakukan pengeringan untuk mengurangi kadar air dalam batubara tersebut. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan alat penelitian dalam skala laboratorium. Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan sampel batubara dengan kadar air yang tinggi (*low rank coal*), batubara yang akan dikeringkan diletakkan pada *drying chamber* yang nantinya mendapatkan hembusan udara panas dari blower yang telah dipanaskan terlebih dahulu dengan sistem *heat exchanger*, dimana aliran udara panas tersebut akan melewati dua jenis bed pengeringan yaitu *perforated plate* dengan diameter lubang 5mm dan *single row blade* dengan kemiringan sudut 20°. Variasi percobaan yang digunakan pada eksperimen ini adalah beban pengeringan batubara sebesar 200 gr, 400 gr, 600 gr tiap variasi eksperimen dengan asumsi bentuk granular berdiameter $\pm 4,75$ mm. Pengambilan sampel batubara dilakukan tiap 1 menit hingga menit ke-5. Selanjutnya dilakukan pengeringan lebih lanjut menggunakan oven pada temperatur 105°C (standart ASTM D 5142) selama 180 menit untuk mendapatkan nilai *moisture content* batubara tersebut.

Dari eksperimen yang telah dilakukan, proses pengeringan yang paling cepat terjadi pada menit pertama saat penggunaan bed pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada beban pengeringan 200 gram. Hal ini dikarenakan pada beban pengeringan 200 gram memiliki luas permukaan yang kecil dibanding beban pengeringan yang lain, karena semakin kecil luas permukaan batubara maka semakin sedikit kandungan air yang dikandung oleh batubara. Selanjutnya penggunaan *single row blade* dengan sudut 20° membuat arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga reynold numbernya mengalami peningkatan. Peningkatan Reynold Number mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa juga mengalami peningkatan. Sehingga, laju perpindahan panas dan massa batubara akan semakin besar. Terjadi penurunan nilai *moisture content* dari 34% hingga menjadi 2%. Nilai *Drying Rate* terbesar dimiliki oleh beban pengeirngan 600 gram yaitu sebesar 42,11 gr/menit. Total massa air yang dapat dilepaskan batubara sebesar 64,46 gram dengan nilai koefisien perpindahan massa aktual sebesar 0,06053 m/s.

Kata kunci: *Drying Bed, Drying Rate, Fluidized Bed Drying, Moisture Content, Udara Pengeringan.*

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF COAL DRYING LOAD VARIATIONS AND BED TYPES IN COAL DRYER

Student Name / NRP : Febriani Sekar Hadiastui / 02111840000054
Departement : Mechanical Engineering FTIRS – ITS
Advisor : Prof. Dr. Eng Ir. Prabowo, M.Eng

Abstract

Steam power plant (PLTU) is a power plant that uses coal as the main fuel. Coal with a high calorific value will make the boiler work more optimally in the combustion process, while the availability of coal mostly has a low calorific value. To increase the calorific value of coal, drying is necessary to reduce the water content in the coal. Experiments were carried out using research tools on a laboratory scale. This experiment was carried out using a sample of coal with a high moisture content (low rank coal), the coal to be dried was placed in a drying chamber which would later get hot air blowing from a blower that had been preheated with a heat exchanger system, where the hot air flow would be through two types of drying beds, namely *perforated plate* with a hole diameter of 5mm and *single row blade* with an angle of 20°. The experimental variation used in this experiment is the coal drying load of 200 gr, 400 gr, 600 gr for each experimental variation assuming a granular shape with a diameter of ± 4.75 mm. Coal sampling was carried out every 1 minute until the 5th minute. Furthermore, further drying was carried out using an oven at a temperature of 105°C (standard ASTM D 5142) for 180 minutes to obtain the moisture content of the coal.

From the experiments that have been carried out, the fastest drying process occurs in the first minute when using a *single row blade* drying bed with an angle of 20° at a drying load of 200 grams. This is because the 200 gram drying load has a small surface area compared to other drying loads, because the smaller the coal surface area, the less water content the coal contains. Furthermore, the use of a *single row blade* with an angle of 20° makes the direction of the drying air flow rotate and becomes turbulent so that the Reynolds number increases. The increase in the Reynolds number resulted in the value of the heat transfer coefficient and mass transfer also increasing. Thus, the rate of heat transfer and coal mass will be even greater. There was a decrease in the value of the moisture content from 34% to 2%. The largest Drying Rate value is owned by the drying load of 600 grams, which is 42.11 gr/minute. The total mass of water that can be released by coal is 64.46 grams with an actual mass transfer coefficient of 0.06053 m/s.

Keywords : *Drying Air, Drying Bed, Drying Rate, Fluidized Bed Drying, Moisture Content.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul : **“STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN DAN JENIS BED PENGEIRNGAN PADA COAL DRYER TERHADAP KARATERISTIK PENGERINGAN BATUBARA”** dengan baik.

Penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan syarat kelulusan akademis untuk memperoleh gelar S-1 Teknik pada departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini, penulis bermaksud menyampaikan terimakasih atas segala bantuan, dukungan, dan bimbingan yang telah diberikan pada penulis selama dilakukannya penyusunan Tugas Akhir ini, khususnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, M. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, bimbingan, saran dan dukungan sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichسانی, M. Eng., Bapak Ary Bachtiar K.P., ST. MT. PhD, Bapak Is Bunyamin Suryo, ST. Msc, dan Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. Selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu dan saran untuk menyempurnakan Tugas Akhir ini.
3. Bapak M. Khoirul Effendi, ST., M.Sc.Eng., PhD., selaku dosen wali selama penulis berkuliah di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Untuk Pak Erdien, Pak Sobar atas bantuannya selama proses pengerjaan Tugas Akhir di Lab Pendingin.
5. Orang tua penulis yang sangat penulis sayangi, Ayah Hadi Sih Nyoto, Ibu Clara Uni Andayani, atas dukungan materil, moril dan juga doa-doa yang telah diberikan kepada penulis selama penulisan Tugas Akhir ini.
6. Budhe penulis, Mulyaningsih atas dukungan materil, moril dan juga doa-doa yang telah diberikan kepada penulis selama penulisan Tugas Akhir ini.
7. Adik penulis, Silvia Cahyani Hadiningsih atas semangat yang terus diberikan dan juga doa-doanya.
8. Nadia Rizqi Andini, atas segala bantuan, canda tawa, sedih tangis dan semua waktu yang diluangkan untuk bertukar opini selama menjadi *partner* eksperimen Tugas Akhir ini hingga penulisan Tugas Akhir terselesaikan dengan baik.
9. Semua anak bimbingan Pak Prabowo yang telah memberi motivasi dan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Semua peneliti yang telah melakukan penelitian terkait *fluidized bed dryer* atas teori dan hasil penelitian yang digunakan sebagai panduan oleh penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
11. *Last but not least, I wanna thank me I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doinng all this hard work I wanna thank me for having no days off. I wanna thank me for never quitting I wanna thank me for always being a giver and tryna give more than I receive*

Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih memiliki kesalahan dan kekurangan. Maka dari itu, penulis berharap adanya saran dan masukan dalam penyempurnaan penulisan Tugas Akhir ini. Penulis berharap, Tugas Akhir ini dapat berguna bagi semua pihak. Penulis juga berharap peneliti selanjutnya dapat mengembangkan penelitian ini sehingga menjadi sebuah penelitian yang lebih baik dan lebih sempurna.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
Abstrak	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xviii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II	4
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	4
2.1.1 Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants	4
2.1.2 Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Beban Pengeringan Pada <i>Cyclone Coal Dryer</i> Terhadap Karakteristik Batubara	6
2.1.3 Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Blade Tipe <i>Single Row Distributor</i> pada <i>Swirling Fluidized Bed Coal Dryer</i> terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara	8
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Konsep Dasar Coal Dryer	9
2.2.2 Batubara	12
2.2.3 Konsep Pengeringan	13
2.2.4 <i>Psychrometric Chart</i>	15
2.2.5 Perpindahan Panas dan Massa	21
BAB III	25
3.1 Metode Eksperimen	25
3.1.1 Skema Peletakan Alat Ukur dan Pengambilan Data	26
3.1.2 Variabel Penelitian	27
3.2 Peralatan Penunjang Eksperimen	28
3.3 Urutan Pelaksanaan Penelitian	31
3.3.1 Persiapan Alat	31
3.3.2 Pengambilan Data	32
3.3.3 Analisis Data Eksperimen	33
3.3.4 Lembar pengambilan data	33
3.3.5 <i>Flowchart</i> Penelitian	34
3.3.6 <i>Flowchart</i> Eksperimen	35
3.3.7 Jadwal Kegiatan	37
BAB IV	38
4.1 Data Hasil Eksperimen	38
4.2 Analisa dan Contoh Perhitungan	38
4.2.1 Perhitungan Flow Open Area pada Bed Pengeringan	38
4.2.2 Perhitungan Kecepatan Minimum Fluidisasi	39

4.2.3	Perhitungan Mass Flow Rate Udara Pengeri ng	40
4.2.4	Contoh Perhitungan Massa Uap Air dan Drying Rate pada Sisi Udara	41
4.2.5	Contoh Perhitungan Moisture Content dan Drying Rate pada Sisi Batubara	44
4.2.6	Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis	45
4.2.7	Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Aktual	46
4.2.8	Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis	47
4.2.9	Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Aktual	47
4.3	Analisa Hasil Eksperimen dari Sisi Batubara	49
4.3.1	Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Moisture Content Fungsi Waktu ..	49
4.3.2	Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Moisture Content Fungsi Waktu pada <i>Perforated plate vs Single row blade</i>	51
4.3.3	Analisa Pengaruh beban pengeringan terhadap drying rate Fungsi Waktu	52
4.3.4	Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Drying Rate Fungsi Waktu pada <i>Perforated plate vs Single row blade</i>	54
4.3.5	Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Ratio Drying Rate (Intensity Drying Rate) Fungsi Waktu	55
4.4	Analisa Hasil dan Pembahasan dari Sisi Udara	57
4.4.1	Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Temperatur Udara Keluar Drying Chamber Fungsi Waktu	57
4.4.2	Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Outlet Temperature Drying Chamber Fungsi Waktu pada <i>Perforated plate vs Single row blade</i>	58
4.4.3	Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Relative Humidity Drying Chamber Fungsi Waktu	60
4.4.4	Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Relative Humidity Outlet Drying Chamber Fungsi Waktu pada <i>Perforated plate vs Single row blade</i>	61
4.4.5	Analisa Udara Pengeri ng pada Diagram Psikrometrik	62
4.4.6	Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Selisih Humidity Ratio Fungsi Drying Time	71
4.5	Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi <i>Perforated plate</i>	72
4.6	Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi <i>Single row blade</i>	74
4.7	Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Koefisien Perpindahan Massa	76
4.8	Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Koefisien Perpindahan Panas	77
BAB V	79
5.1	Kesimpulan	79
5.2	Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	82

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Alat Penelitian	4
Gambar 2.2 Pengaruh Laju Pengerinan Batubara Terhadap Penghematan	5
Gambar 2.3 Pengaruh Kecepatan Udara Dan Ukuran Batubara Terhadap Laju Pengerinan Batubara	5
Gambar 2.4 Pengaruh Temperatur Udara Terhadap Laju Pengerinan Batubara	6
Gambar 2.5 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>moisture content</i> dalam fungsi <i>drying time</i>	7
Gambar 2.6 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>drying rate</i> fungsi <i>drying time</i>	7
Gambar 2.7 Grafik hubungan antara Relative Humidity dan waktu	7
Gambar 2.8 Grafik hubungan antara temperature udara outlet chamber dan waktu	8
Gambar 2.9 Skema Cyclone coal dryer	9
Gambar 2.10 Drying chamber	9
Gambar 2. 11 skema aliran udara pengering dalam fluidisasi	10
Gambar 2.12 Free body diagram jenis bed pengering	10
Gambar 2.13 grafik fungsi moisture conten terhadap waktu	13
Gambar 2.14 Prinsip pengeringan pada diagram psikrometrik	15
Gambar 2.15 Proses yang dialami oleh udara pada diagram pskrometrik.....	16
Gambar 2.16 Proses pemanasan	17
Gambar 2.17 Proses cooling	17
Gambar 2.18 Proses pelembaban	17
Gambar 2.19 Proses penurunan pelembaban	18
Gambar 2.20 Proses pemanasan dan pelembaban	18
Gambar 2.21 Proses pemanasan dan penurunan pelembaban	19
Gambar 2. 22 Proses pendinginan dan pelembaban	19

Gambar 2.23 Proses pendinginan dan penurunan kelembaban	20
Gambar 2.24 Proses pengeringan batubara.....	21
Gambar 3.1 Instalasi alat eksperimen	25
Gambar 3.2 Profil <i>Perforated plate</i>	26
Gambar 3.3 profil <i>Single row blade</i>	26
Gambar 3.4 Skema peletakan alat pengukur kecepatan udara pengering.....	27
Gambar 3.5 Skema peletakan RH meter.....	27
Gambar 4.1 Dimensi <i>Perforated plate</i> diameter 5 mm	38
Gambar 4.2 Dimensi <i>Perforated plate</i> dengan sudut 20°	39
Gambar 4.3 Kondisi udara <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada menit ke-1 untuk beban pengeringan 200 gr dengan diameter <i>perforated plate</i> 5 mm.....	41
Gambar 4.4 Kondisi udara <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada menit ke-1 untuk beban pengeringan 200 gr dengan <i>single row blade</i> sudut inklinasi 20°	43
Gambar 4.5 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>moisture content</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i>	49
Gambar 4.6 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>moisture content</i> fungsi waktu pada <i>single row blade</i>	50
Gambar 4.7 Grafik perbandingan pengaruh beban pengeringan terhadap <i>moisture content</i> terhadap fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i>	51
Gambar 4.8 Grafik perbandingan pengaruh beban pengeringan terhadap <i>moisture content</i> terhadap fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i> beban pengeringan 200 gr	51
Gambar 4.9 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>drying rate</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i>	52
Gambar 4.10 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>drying rate</i> fungsi waktu pada <i>single row blade</i>	53
Gambar 4.11 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>drying rate</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i>	54
Gambar 4.12 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>drying rate</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i> beban pengeringan 200 gr	54
Gambar Gambar 4.13 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar <i>drying chamber</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i>	55

Gambar 4.14 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar <i>drying chamber</i> fungsi waktu pada <i>single row blade</i> beban pengeringan 200 gram	55
Gambar 4.15 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar <i>drying chamber</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i>	56
Gambar 4.16 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar <i>drying chamber</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i> beban pengeringan 200 gram ...	57
Gambar 4.17 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>relative humidity outlet</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i>	58
Gambar 4.18 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>relative humidity outlet</i> fungsi waktu pada <i>single row blade</i>	58
Gambar 4.19 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>relative humidity outlet</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i>	59
Gambar 4.20 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>relative humidity outlet</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i> dan <i>single row blade</i>	60
Gambar 4.21 Grafik psikrometrik udara pengering pda <i>perforated plate</i> beban pengeringan 200 gr	61
Gambar 4.22 Grafik psikrometrik udara pengering pda <i>perforated plate</i> beban pengeringan 400 gr	62
Gambar 4.23 Grafik psikrometrik udara pengering pda <i>perforated plate</i> beban pengeringan 600 gr	63
Gambar 4.24 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada <i>perforated plate</i> dengan beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr	64
Gambar 4.25 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada <i>single row blade</i> dengan beban pengeringan 200 gram	64
Gambar 4.26 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada <i>single row blade</i> dengan beban pengeringan 400 gram	65
Gambar 4.27 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada <i>single row blade</i> dengan beban pengeringan 600 gram	66
Gambar 4.28 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada <i>single row blade</i> dengan beban pengeringan 200gram, 400gram dan 600 gram	67
Gambar 4.29 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada <i>perforated plate</i> vs <i>single row blade</i> dengan beban pengeringan 200 gram.....	68
Gambar 4.30 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>humidity ratio</i> fungsi waktu pada <i>perforated plate</i>	69

Gambar 4.31 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>humidity ratio</i> fungsi waktu pada <i>single row blade</i>	69
Gambar 4.32 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 200 gram	70
Gambar 4.33 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 400 gram	70
Gambar 4.34 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 600 gram	71
Gambar 4.35 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 200 gram	72
Gambar 4.36 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 400 gram	72
Gambar 4.37 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 600 gram	73
Gambar 4.38 Pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan massa pada <i>single row blade</i>	74
Gambar 4.39 Pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan massa pada <i>single row blade</i>	74

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Jenis-jenis batubara berdasarkan nilai kalornya	1
Tabel 2.2 <i>typical ultimate analyses for coal</i>	12
Tabel 3.1 Lembar Pengambilan Data	33
Tabel 3.2 Jadwal kegiatan.....	37
Tabel 4.1 <i>Properties</i> udara pengering pada menit ke 1	41
Tabel 4.2 Nilai <i>humidity ratio</i> udara <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada menit ke-1	41
Tabel 4.3 Nilai <i>humidity ratio</i> udara <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada menit ke-1	42
Tabel 4.4 Nilai <i>humidity ratio</i> udara <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada menit ke-1	43
Tabel 4.5 Data massa batubara hasil eksperimen	41
Tabel 4.6 Data massa batubara hasil eksperimen	45

DAFTAR SIMBOL

Simbol

A	= Luas area	m^2
C_d	= Drag coefficient	
$C_{A,s}$	= Konsentrasi uap permukaan bahan	$kgmol/m^3$
$C_{A,\infty}$	= Konsentrasi uap air medium pengering	$kgmol/m^3$
D	= Diameter	m
DF	= <i>Drag force</i>	$kg.m/s^2$
g	= Percepatan gravitasi	m/s^2
h	= Koefisien konveksi perpindahan panas	$W/m^2.K$
h_{fg}	= Evaporation enthalpy	kJ/kg
h_m	= Koefisien konveksi perpindahan massa	m/s
k_f	= Koefisien konduksi perpindahan panas	$W/m^2.K$
L	= Luas	m^2
m	= Massa	kg
\dot{m}	= Laju aliran massa	kg/s
MC	= <i>Moisture content</i>	%
N_A	= Laju perpindahan molar	kmol/s
n_A	= Laju perpindahan massa	kg/s
Nu	= <i>Nusselt number</i>	
Pr	= <i>Prandtl number</i>	
Q	= Laju perpindahan panas	W
r	= Jari-jari	m
Re	= <i>Reynold number</i>	
S_c	= <i>Schmidt number</i>	
S_h	= <i>Sherwood number</i>	
T	= Temperatur	K
v	= Kecepatan	m/s
W	= Berat	$kg.m/s^2$

Simbol Yunani

μ	= Viskositas absolut udara pengering	m^2/s
ρ	= Massa jenis	kg/m^3
∇	= Volume	m^3
ω	= <i>Relative humidity</i>	%
π	= Rasio keliling lingkaran dengan diameternya	

Subscript

∞	= <i>Ambient</i>
Δ	= Perubahan
0	= Awal
1	= Menit 1
C	= <i>Chamber</i>
in	= Inlet
out	= Outlet
S	= Permukaan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi di Indonesia terus menerus bertambah terutama untuk batubara, sehingga produksi batubara Indonesia diperkirakan akan terus meingkat. Peningkatan produksi batubara tersebut untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (pembangkit listrik dan industri) dan permintaan luar negeri (ekspor). Batubara pada dasarnya merupakan bahan bakar fosil yang berasal dari proses dekomposisi makhluk hidup jutaan tahun yang lalu dan termasuk kedalam kategori batuan sedimen. Berdasarkan proses pembentukannya batubara dapat dikelompokkan menjadi 5 kelompok yaitu antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit, dan gambut. Pengelompokan tersebut telah diurutkan berdasarkan tingginya kualitas pembakaran batubara.

Indonesia memiliki cadangan batubara sebesar 28,2 milyar ton dengan sumber daya sebesar 161,3 milyar ton. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 45 Tahun 2003 tentang PNBPN batubara, mengklasifikasikan batubara menjadi empat jenis berdasarkan nilai kalornya. Klasifikasi pada tabel dibuat berdasarkan basis air dried basis (adb).

Jenis Batubara	Nilai Kalor Batubara (kal/gr)
Batubara Kalor Rendah	< 5100
Batubara Kalor Sedang	5100 – 6100
Batubara Kalor Tinggi	6100 – 7100
Batubara Kalor Sangat Tinggi	> 7100

Tabel 1.1 Jenis – jenis batubara beserta nilai kalornya

Batubara Indonesia memiliki kekurangan pada kualitas pembakarannya, kualitas pembakaran batubara Indonesia termasuk dalam batubara kelas menengah ke bawah. Maka dari itu diperlukannya sebuah perlakuan khusus untuk menaikkan nilai kalor pada batubara, sehingga dikembangkan beberapa perlakuan khusus terhadap batubara berkualitas rendah tersebut.

Sebagian besar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia menggunakan batubara dengan kualitas rendah sebagai bahan bakar utama. Salah satu komponen utama boiler dalam PLTU adalah Coal Firing System (CFS) yang berfungsi memanaskan batubara untuk memanaskan boiler, Subsistem CFS terdiri dari 5 komponen utama yaitu coal feeder, pulverizer, primary air fan, (d) air heater dan coal burner. Salah satu dari komponen tersebut yaitu pulverizer berfungsi untuk menghancurkan dan menghaluskan batubara sebelum digunakan dalam boiler. Mesin ini bekerja secara kontinu untuk dapat mengoptimalkan pembangkit, biasanya dipasang standby pulverizer untuk menggantikan jika ada pulverizer yang rusak. Batubara dengan spesifikasi dibawah ketentuan boiler akan berakibat dibutuhkannya pasokan yang lebih untuk bisa memanaskan boiler. Hal ini berdampak pada pulverizer yang harus beroperasi lebih berat agar dapat memenuhi kapasitas yang diinginkan dari boiler tersebut. Jika terjadi kerusakan pada salah satu pulverizer, maka kapasitas mill dari batubara akan berkurang sehingga mengakibatkan supply batubara ke boiler juga akan berkurang. Boiler akan berkerja kurang maksimal dan akan berdampak pada performance PLTU. Maka dari itu kualitas dari batubara akan sangat penting dalam menentukan peralatan yang dipergunakan agar efisien serta meningkatkan reliability dari komponen-komponen PLTU dalam penggunaannya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas

batubara adalah dengan proses pengeringan, sehingga dapat menurunkan jumlah moisture content di dalam batubara yang dapat meningkatkan nilai heating valuenya.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian proses batubara yang akan dilakukan diharapkan mampu meningkatkan kualitas batubara. Berikut merupakan beberapa rumusan masalah yang telah dibuat.

1. Bagaimana pengaruh sudut 20° pada bed pengeringan jenis *single row blade* terhadap *drying rate* pada beban pengeringan sebesar 200 gr, 400 gr, dan 600 gr.
2. Bagaimana pengaruh lubang diameter 5 mm pada bed pengeringan jenis *single row blade* terhadap *drying rate* pada beban pengeringan sebesar 200 gr, 400 gr, dan 600 gr.
3. Bagaimana hubungan perpindahan panas dan massa terhadap proses pengeringan batubara.
4. Bagaimana karakteristik udara pengering dalam grafik psikrometrik.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian kali ini, ditentukan beberapa batasan masalah diantaranya:

1. Massa batubara yang digunakan 200 gr, 400 gr dan 600 gr.
2. Batubara yang digunakan berdiameter 4,75 mm.
3. Sudut blade yang digunakan 20° .
4. Moisture content dari seluruh partikel batubara sebelum proses pengeringan sama.
5. Heatloss pada dinding drying chamber ke sekitar diabaikan.
6. Proses pengeringan berlangsung secara steady state.
7. Percobaan penelitian dilakukan pada temperature ruangan (25°C).
8. Alat ukur yang digunakan telah terkalibrasi.

1.4 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian mengenai pengeringan batubara yaitu:

1. Mengetahui pengaruh sudut 20° pada bed pengeringan jenis *single row blade* terhadap *drying rate* pada beban pengeringan sebesar 200 gr, 400 gr, dan 600 gr.
2. Mengetahui pengaruh lubang diameter 5 mm pada bed pengeringan jenis *single row blade* terhadap *drying rate* pada beban pengeringan sebesar 200 gr, 400 gr, dan 600 gr.
3. Mengetahui hubungan perpindahan panas dan massa terhadap proses pengeringan batubara.
4. Mengetahui karakteristik udara pengering dalam grafik psikrometrik.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah diuraikan diatas, maka manfaat dilaksanakannya penelitian ini adalah:

1. Memperluas pengetahuan tentang studi eksperimental mengenai proses pengeringan batubara dalam pengembangan teknologi coal dryer sebagai upaya untuk menaikkan

kualitas batubara. Sebagai perhitungan hasil eksperimental yang nantinya bisa digunakan untuk perbandingan metode pengeringan yang lain.

2. Memaksimalkan penggunaan batubara dengan level rendah dengan proses pengeringan.

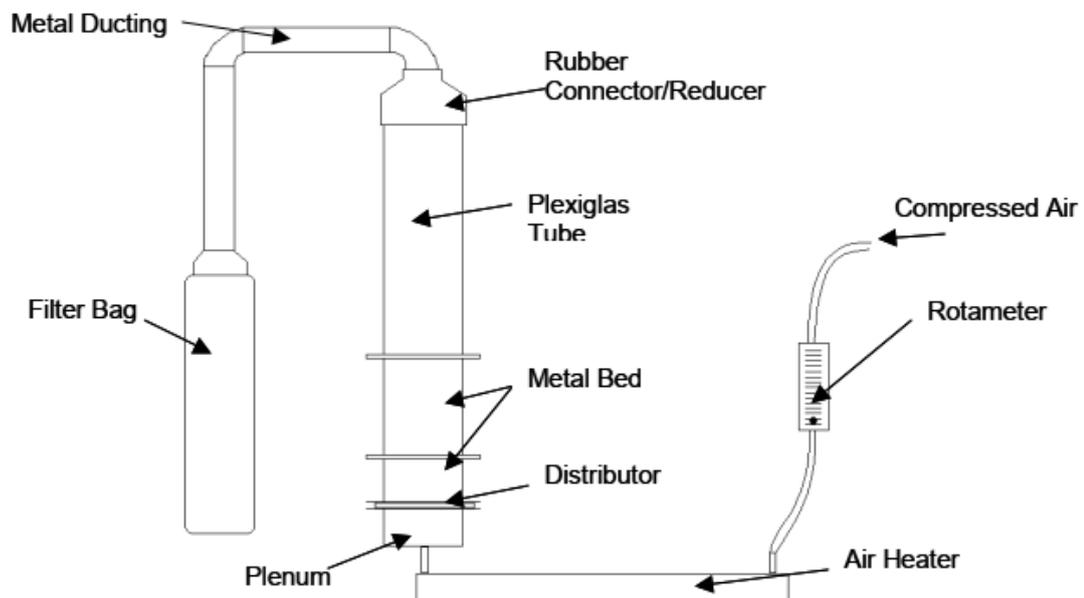
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

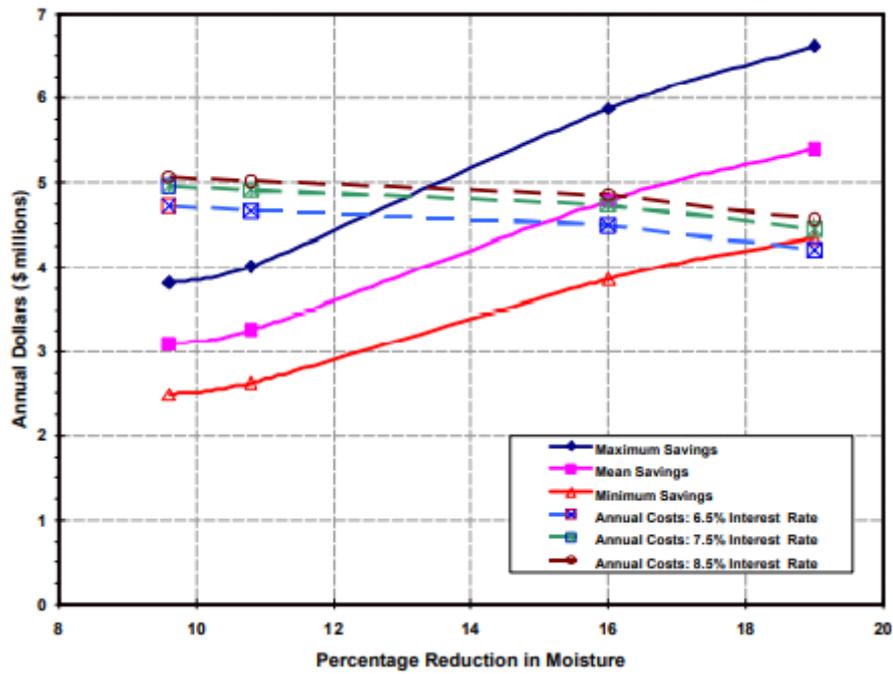
2.1.1 Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants

Pada penelitian yang dilakukan oleh Levy dkk (2006), mereka merancang peralatan ekperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara seperti pada gambar 2.1. Pengujian alat eksperimen dilakukan dalam naungan Riset Energi *Center Fluidized Bed Laboratory*. Ruang pengeringan yang dipakai bertipe *fluidized bed* dengan diameter 6 inci. Udara pemanas dirancang mencapai suhu 150 °F dengan kecepatan 1,6 m/s. Pada jurnalnya yang berjudul “*Use of Coal Drying to Reduce Waterconsumsed in Pulvirized Coal Power Plants*” Levy melakukan penelitian terhadap efek pengeringan batubara dalam upaya untuk mengurangi kandungan air dalam batubara.

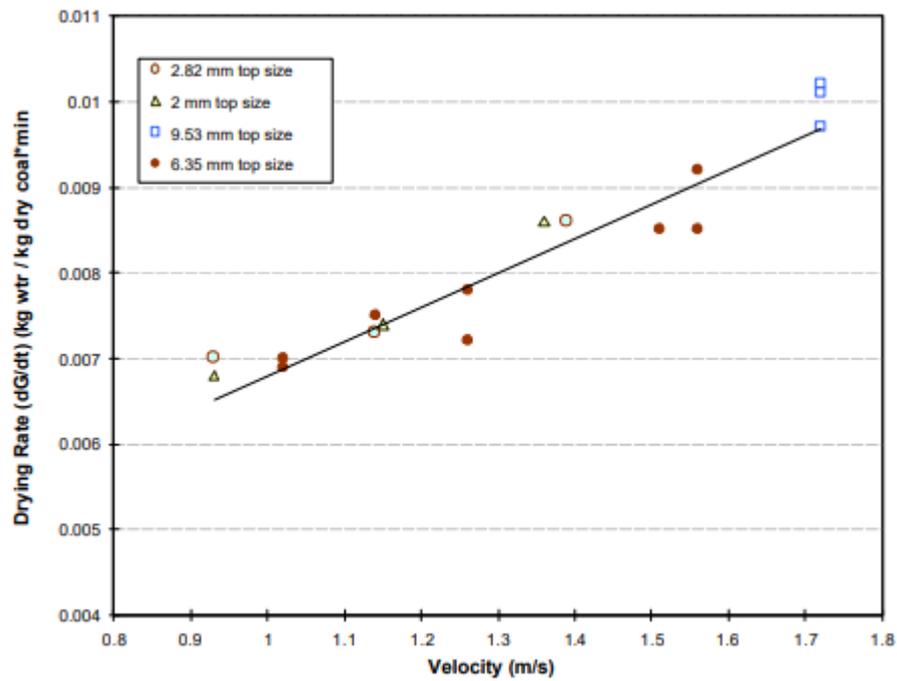


Gambar 2.1 Skema Alat Penelitian

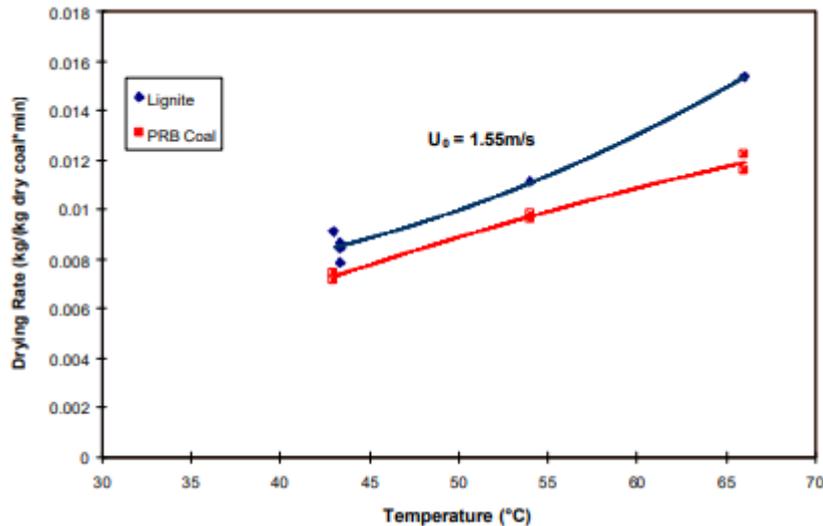
Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil berupa pengaruh pemakaian sistem pengering batubara terhadap keuntungan yang didapatkan dari penghematan yang diciptakan dari proses pengeringan batubara. Kandungan air yang berada di dalam batubara dapat dikurangi dari proses pengeringan. Batubara akan memiliki nilai kalor yang lebih baik dengan berkurangnya kandungan air 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. Dalam penelitiannya, Levy 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 2.2 Pengaruh laju pengeringan batubara terhadap penghematan



Gambar 2.3 Pengaruh kecepatan udara dan ukuran batubara terhadap laju pengeringan batubara

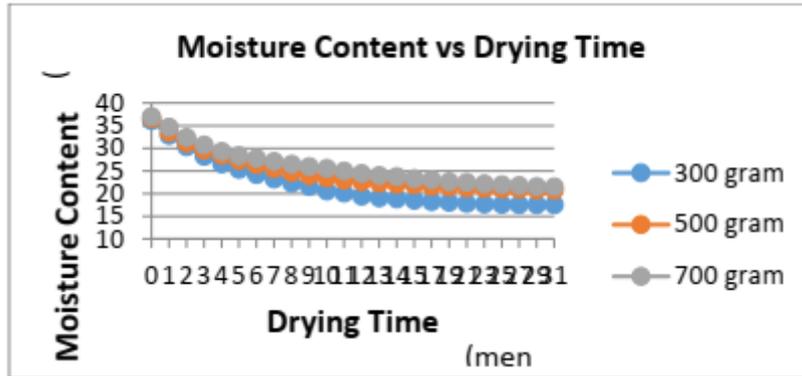


Gambar 2.4 Pengaruh temperatur udara terhadap laju pengeringan batubara

Pada gambar 2.3 laju pengeringan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan udara pada sisi *inlet*, tetapi menghasilkan kurva yang sama pada setiap distribusi ukuran partikel batubara. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan udara lebih berpengaruh terhadap laju pengeringan dibandingkan dengan ukuran batubara. Kemudian pada gambar 2.3 merupakan grafik hubungan antara suhu dan laju pengeringan. Dimana temperature dari udara pemanas dilewatkan pada ruang pengering, temperature udara pemanas divariasikan pada rentang suhu 43 °C hingga 66 °C dengan batubara berjenis *lignite* dan *Powder River Basin* (PRB). Dari grafik diatas dapat dilihat bahawa dengan meningkatnya suhu udara pemanas maka akan meningkatkan laju pengeringan batubara.

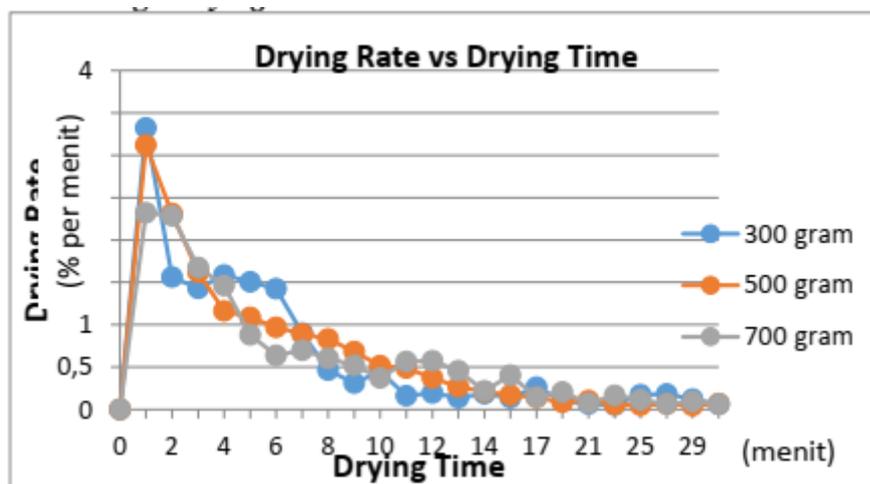
2.1.2 Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Beban Pengeringan Pada *Cyclone Coal Dryer* Terhadap Karakteristik Batubara

Eksperimen yang dilakukan oleh **Kukuh Ridho (2017)**, menggunakan alat penelitian dalam skala laboratorium yaitu *cyclone coal dryer*. Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan sample batubara dengan kadar air yang tinggi (*low rank coal*). Udara panas akan dialirkan melewati blade dengan sudut inklinasi 20° sehingga membentuk aliran yang mengikuti sudut blade tersebut. Beban yang digunakan sebesar 300gr, 500 gr, dan 700 gr. Pengambilan data eksperimen untuk moisture content dilakukan sebanyak 15 kali untuk setiap 1 menit, kemudian sebanyak 8 kali untuk setiap 2 menit. Pengambilan data eksperimen untuk moisture content dilakukan sebanyak 15 kali untuk setiap 1 menit, kemudian sebanyak 8 kali untuk setiap 2 menit.



Gambar 2.5 Pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* dalam fungsi *drying time*

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan didapatkan hubungan pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* dalam fungsi *drying time*. Gambar 2.5 menunjukkan bahwa beban pengeringan memengaruhi laju *drying rate*, ini karena adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada permukaan batubara.

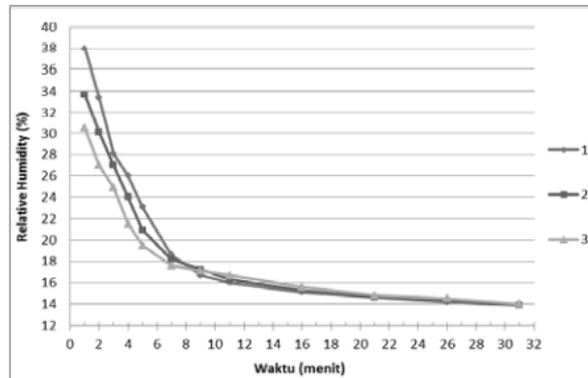


Gambar 2.6 Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi *drying time*

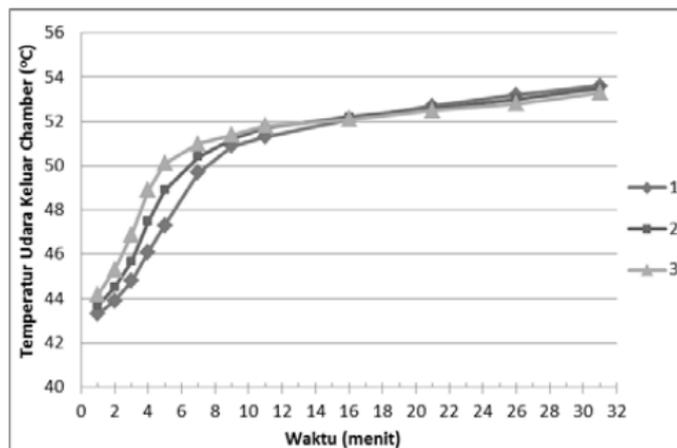
Gambar 2.6 menunjukkan penurunan nilai *drying rate* yang menunjukkan bahwa besarnya nilai *moisture content* yang berkurang tiap satuan waktu, untuk besar nilai penurunan *drying rate* dipengaruhi oleh beban pengeringan yang digunakan. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada permukaan batubara. Daya serap menurun maka laju pengeringan akan menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah beban yang lebih kecil. Lalu pengaruh dari hubungan antara

variasi beban dengan nilai koefisien perpindahan massa, dimana semakin banyak jumlah beban pengeringan maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan massanya.

2.1.3 Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Blade Tipe *Single Row Distributor* pada *Swirling Fluidized Bed Coal Dryer* terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara



Gambar 2.7 Grafik hubungan antara relative humidity dan waktu



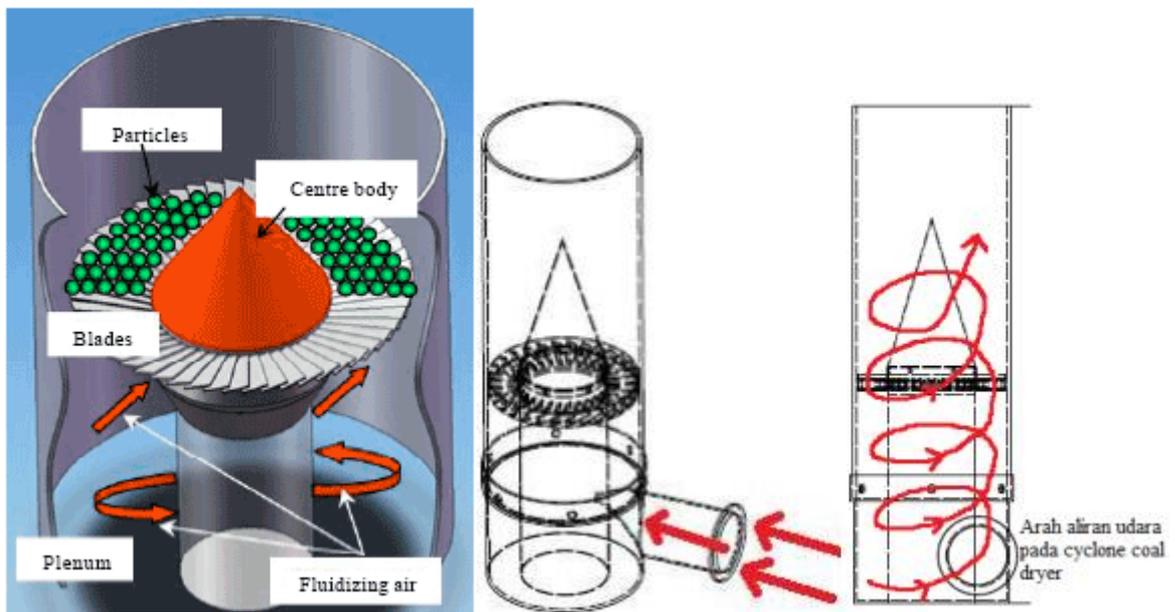
Gambar 2.8 Grafik hubungan antara temperature udara outlet chamber dan waktu

Pada eksperimen yang dilakukan menggunakan alat percobaan *Swirling Fluidized Bed Coal Dryer*, udara panas dengan temperature 55 °C dihembuskan oleh blower ke dalam chamber melewati bed berupa blade yang membentuk sudut inklinasi 10°, 20° dan 30° dengan massa batubara sebesar 600 gram. Dari hasil eksperimen diketahui bahwa temperature yang keluar dan penurunan relative humidity tertinggi terjadi pada blade dengan sudut inklinasi sebesar 10°.

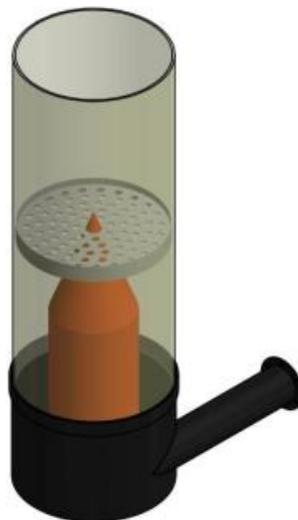
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Konsep Dasar Coal Dryer

Coal dryer adalah alat pengering batubara yang menggunakan prinsip fluidisasi. Fluidisasi merupakan proses pengontakan butiran-butiran padat secara bebas dengan fluida baik itu fluida cair maupun fluida gas. Gaya drag akan terjadi ketika butiran padat dikenakan udara (fluida) yang bergerak dengan kecepatan tertentu. Fluidisasi dapat dikatakan terjadi jika nilai drag force dari partikel lebih besar dibanding gaya beratnya atau dengan kata lain aliran gas telah berhasil mengangkat seluruh partikel yang berada didalam *drying chamber*. Kondisi ini dinyatakan sebagai kondisi minimum fluidisasi dan kecepatan gas yang dibutuhkan disebut sebagai kecepatan minimum fluidisasi. Secara umum bentuk visual dari cyclone coal dryer dapat diilustrasikan pada gambar 2.9.

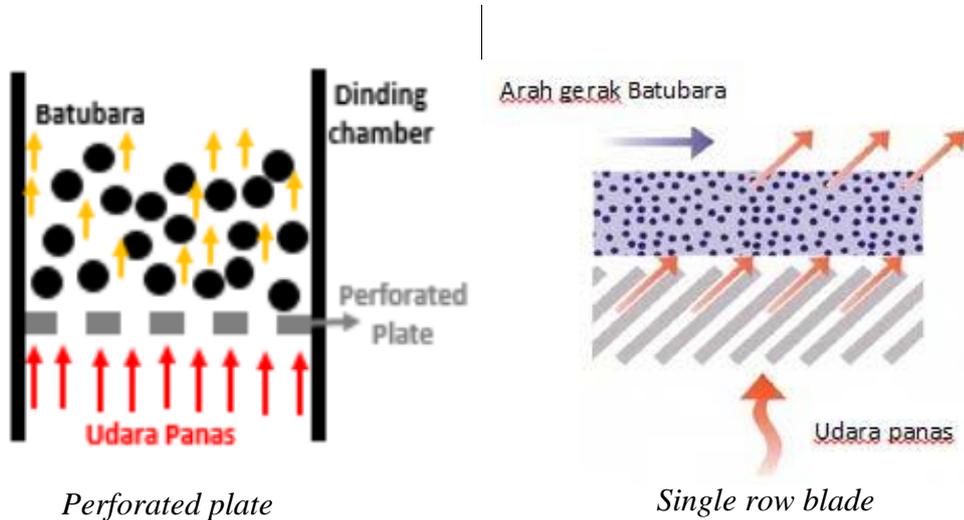


Gambar 2.9 Skema pada *cyclone coal dryer*



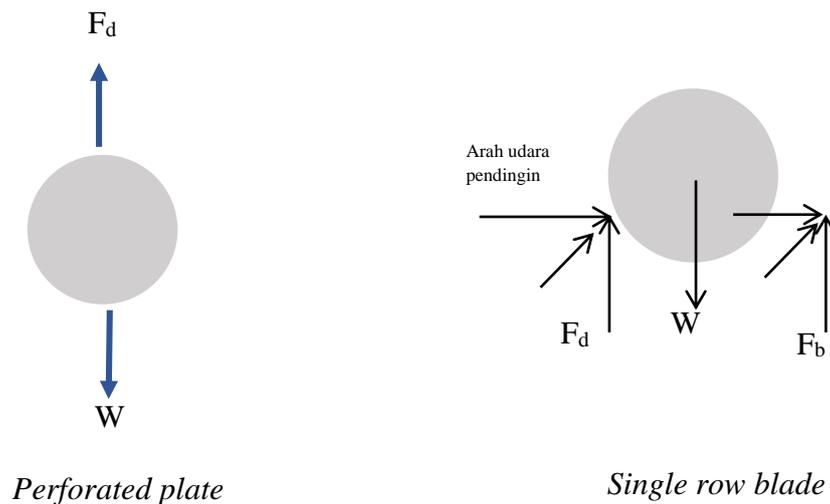
Gambar 2.10 *Drying Chamber*

Pada *coal dryer*, sistem bekerja dengan cara melewatkan aliran uap panas melalui sisi bawah *drying chamber* dengan menggunakan blower. Di bagian tengah *drying chamber* terdapat bed pengering yang digunakan sebagai pengarah aliran. Pada eksperimen kali ini digunakan 2 jenis bed pengeringan yaitu *perforated plate* dan *single row blade*. Gambar 2.10 dibawah ini menunjukkan skema aliran udara pengering pada *perforated plate* dan *single row blade*.



Gambar 2.11 Skema aliran udara pengering dalam fluidisasi

Udara panas sebagai udara pengering dalam proses *drying* dihembuskan oleh *blower* sentrifugal yang terletak sebelum bagian *drying chamber*, udara tersebut memasuki daerah *inlet* yang terletak dibagian bawah *drying chamber* dan menuju bagian *outlet* yang berada diatas. Untuk perhitungan fluidisasi minimum dimana kondisi saat batubara *floating* (mengambang) yang disebabkan oleh kecepatan udara. Sehingga perhitungan fluidisasi minimum didapatkan dari Hukum Newton I yaitu:



Gambar 2.12 Free Body Diagram

Untuk *perforated plate*:

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= 0 \\ Fd - W &= 0 \\ Fd &= W\end{aligned}$$

Dari persamaan dapat digunakan untuk menghitung kecepatan minimum yang dibutuhkan yaitu

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} C_d \rho_{udara} V^2 A &= \rho_{batubara} \forall g \\ V &= \sqrt{\frac{2 \rho_{batubara} \forall g}{C_d \rho_{udara} A}}\end{aligned}$$

Untuk *single row blade*:

$$\begin{aligned}\Sigma F &= 0 \\ F_D \sin \theta + F_B \sin \theta - W &= 0 \\ F_D + F_b &= W\end{aligned}$$

Dari persamaan dapat digunakan untuk menghitung kecepatan minimum yang dibutuhkan yaitu

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{udara} \cdot v^2 \cdot A \sin \theta &= \rho_{batubara} \cdot \forall \cdot g \\ V &= \sqrt{\frac{2 \rho_{batubara} \cdot \forall \cdot g}{C_D \cdot \rho_{udara} \cdot A \sin \theta}}\end{aligned}$$

dimana:

$F_d =$ gaya drag dari batubara $(kg \cdot \frac{m}{s^2})$

$F_b =$ bouyancy force (diabaikan karena kecil)

$W =$ berat batubara $(kg \cdot \frac{m}{s^2})$

$C_d =$ koefisien drag batubara

$V =$ kecepatan fluidisasi minimum $(\frac{m}{s})$

$A =$ luas permukaan batubara (m^2)

$\forall =$ volume batubara (m^3)

$g =$ percepatan gravitasi $(\frac{m}{s^2})$

2.2.2 Batubara

Batubara secara umum dapat didefinisikan sebagai batuan organik berwarna gelap yang terbentuk dari jasad tumbuh-tumbuhan. Kandungan utama dari batubara adalah karbon, hidrogen, dan oksigen. Berdasarkan tabel dibawah ini batubara dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Class	Group		Fixed Carbon	Volatile matter	Heating values
	Name	Symbol	Dry (%)	Dry (%)	Drybasis (kkal/kg)
Anthracite	meta-anthracite	Ma	>98	>2	7740
	Anthracite	An	92-98	2.0-8.0	8000
	semianthracite	Sa	86-92	8.0-15	8300
Bituminous	low-volatile	Lvb	78-86	14-22	8741
	medium volatile	mvb	89-78	22-31	8640
	high-volatile A	hvAb	<69	>31	8160
	high-volatile B	hvBb	57	57	6750-8160
	high-volatile C	hvCb	54	54	7410-8375
Subbituminous	subbituminous A	subA	55	55	6880-7540
	subbituminous B	subB	56	56	6540-7230
	subbituminous C	subC	53	53	5990-6860
Lignite	lignite A	ligA	52	52	4830-6360
	lignite B	ligB	52	52	<5250

Sumber : Mutasim., 2007

Tabel 2.2 Typical Ultimate Analyses for Coals

Kualitas batubara dapat ditentukan dengan 2 jenis metode analisis, yaitu *proximate analysis* dan *ultimate analysis*. *Proximate analysis* merupakan metode analisis dengan pemeriksaan properti dasar batubara yang dapat memengaruhi proses pembakaran, seperti *moisture content*, *volatile matter content*, *ash yield*, dan *fixed carbon yield*. Sedangkan *ultimate analysis* merupakan metode analisis dengan pemeriksaan komposisi unsur kimia yang terkandung didalam batubara seperti karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, oksigen dan klorin. Salah satu properti dasar batubara yang dapat memengaruhi proses pembakaran adalah *moisture content*. Moisture content dapat berpengaruh pada proses ignition dimana penguapan moisture content akan memakan energi dan kemudian dapat mengambat proses pembakaran. Terdapat empat jenis moisture content yang mungkin terjadi pada batubara yaitu:

1. Surface moisture: kandungan air yang terdapat pada permukaan batubara.
2. Hydroscopic moisture: kandungan air yang terdapat pada rongga kapiler batubara.
3. Decomposition moisture: kandungan air yang terdekomposisi dengan senyawa organik di dalam batubara.
4. Mineral moisture: kandungan air yang merupakan bagian struktur kristal dari silika hidrat seperti tanah liat.

Persamaan di bawah ini dapat digunakan untuk menghitung persen kadar air dalam batubara.

$$\%MC = \frac{M_w - W_d}{M_w} \times 100\%$$

M_w = Massa batubara basah (kg)

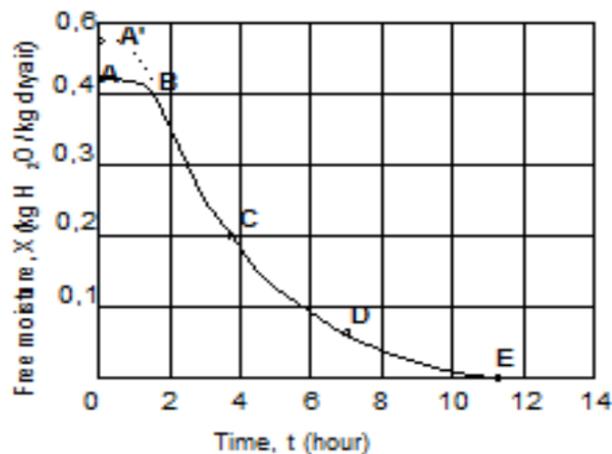
M_d = Massa batubara kering (kg)

Salah satu parameter penting dalam kualitas bahan bakar adalah nilai kalor (*heating value*). Nilai kalor sendiri adalah jumlah energi yang dilepaskan ketika suatu bahan bakar dibakar secara sempurna dalam suatu proses aliran tunak. Terdapat dua jenis nilai kalor saat terjadinya proses yaitu nilai kalor atas dan nilai kalor bawah. . Nilai kalor atas adalah nilai kalor batubara saat seluruh uap air yang terbentuk selama proses pembakaran terkondensasi secara menyeluruh. Nilai kalor bawah adalah nilai kalor batubara saat uap air yang terbentuk selama proses pembakaran tidak terkondensasi. Pada kondisi aktual nilai kalor bawah lebih mendekati nilai kalor batubara yang telah dipengaruhi oleh faktor lingkungan.

2.2.3 Konsep Pengeringan

Pengeringan adalah sebuah proses penghilangan cairan yang pada umumnya berupa air, yang berada dalam zat padat basah dengan memberikan panas dan akhirnya dihasilkan zat padat bebas cairan. Pada konsep pengeringan ini produk mengalami proses pengurangan *moisture content* pada produk dimana dilalui dengan proses pengeringan batubara. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kalor setinggi mungkin dengan cara mengurangi *moisture content* dalam batubara. Kadar air yang terkandung dalam batubara harus sedikit mungkin, karena akan memengaruhi kualitas dari produk tersebut.

Proses pengeringan batubara memiliki beberapa tahapan hingga produk yang dihasilkan telah sesuai. Secara umum ada tiga tahapan dalam proses ini, untuk yang pertama tahapan laju pengeringan naik dimana kondisi awal sesaat produk batubara menerima panas dari udara pengering, selanjutnya yaitu tahapan laju pengeringan konstan dimana pada tahapan ini terjadi titik kritis (*critical moisture content*) pada batubara. Dan berikutnya adalah tahapan laju pengeringan menurun dimana pada saat itu kondisi air tidak dapat mempertahankan lapisan air sehingga seluruh bagian mengering.



Gambar 2.13 Grafik fungsi *moisture content* terhadap waktu

Pada grafik diatas terdapat beberapa tahapan dalam proses pengeringan untuk batubara, berikut penjelasannya:

1. Tahapan Laju Pengeringan Naik (A-B)

Pada tahapan ini yaitu sesaat setelah batubara menerima panas dari udara pengering sebagai sumber panas, maka suhu batubara yang dikeringkan akan meningkat hingga mencapai kesetimbangan dengan *temperature wet bulb* dari udara (T_{wb}).

2. Tahapan Laju Pengeringan Konstan (B-C)

Pada tahapan ini permukaan dari batubara akan mengalami fase jenuh dikarenakan oleh uap air, temperatur T_{wb} dari udara akan sama dengan temperatur dari uap air yang terjadi pada permukaan batubara. Tahapan ini akan berakhir apabila nilai kandungan air bebas batubara telah mencapai titik kritis (*critical moisture content*). Titik kritis yang dimaksudkan pada tahapan ini adalah nilai dari kadar air bebas berada pada kondisi terendah ketika laju kecepatan air bebas menuju permukaan sama dengan laju penguapan.

3. Tahapan Laju Pengeringan menurun Awal

Kondisi pada titik C adalah dimana terjadi *critical moisture content* atau kondisi kritis dari kadar air bebas yang terkandung dalam batubara. Pada pada titik kritis ini adalah air pada permukaan batubara tidak dapat lagi untuk mempertahankan lapisan air yang kontinyu, hal ini menyebabkan seluruh permukaan akan terus mengering hingga mencapai titik D.

4. Tahapan Laju Pengeringan Menurun Kedua

Pada tahapan kedua dari laju pengeringan menurun ini, yaitu dimulai dari titik D pada gambar dimana saat kondisi dari batubara telah kering. Hal ini disebabkan adanya perbedaan konsentrasi antara dalam dan lapisan permukaan batubara, sehingga air yang berada didalam akan bergerak menuju permukaan. Pada tahapan ini kecenderungan jumlah dari *moisture content* yang dikeringkan relatif kecil dan waktu yang dibutuhkan relatif lama.

Pada proses pengeringan ada beberapa faktor yang memengaruhi laju pengeringan diantaranya adalah luas permukaan kontak, perbedaan suhu antara batubara dengan udara pengering, kecepatan aliran udara pengering, dan kelembaban relatif udara pengering.

1. Luas Permukaan

Air yang berada dibagian tengah akan bergerak menuju permukaan dan terjadi penguapan. Secara umum untuk mempercepat proses pengeringan batubara harus dihaluskan ataupun dipotong-potong menjadi bagian kecil-kecil terlebih dahulu. Hal ini memiliki tujuan memperluas lapisan permukaan dari batubara sehingga akan mempermudah air untuk terkondensasi. Lapisan yang tipis ataupun partikel kecil dapat mengurangi jarak dimana panas harus masuk hingga titik pusat batubara.

2. Perbedaan Suhu dan Udara Sekitar

Perbedaan yang terjadi antara batubara dengan medium pengering apabila semakin besar akan mempercepat perpindahan panas menuju dalam batubara, dan menyebabkan proses kondensasi menjadi lebih cepat. Air hasil pengeringan batubara akan merubah udara menjadi jenuh sehingga menurunkan kemampuan untuk menyerap air. Sehingga dengan meningkatnya temperatur pengeringan maka perpindahan massa akan semakin cepat.

3. Kecepatan Aliran Udara

Kecepatan yang semakin tinggi dari udara pengering akan mengambil uap air dan menghilangkan uap air dari bagian permukaan batubara. Hal ini akan mencegah terjadinya udara jenuh, sehingga proses perpindahan massa air tidak terhambat. Proses pengeringan akan semakin cepat sehingga semakin cepat dan mudah uap air

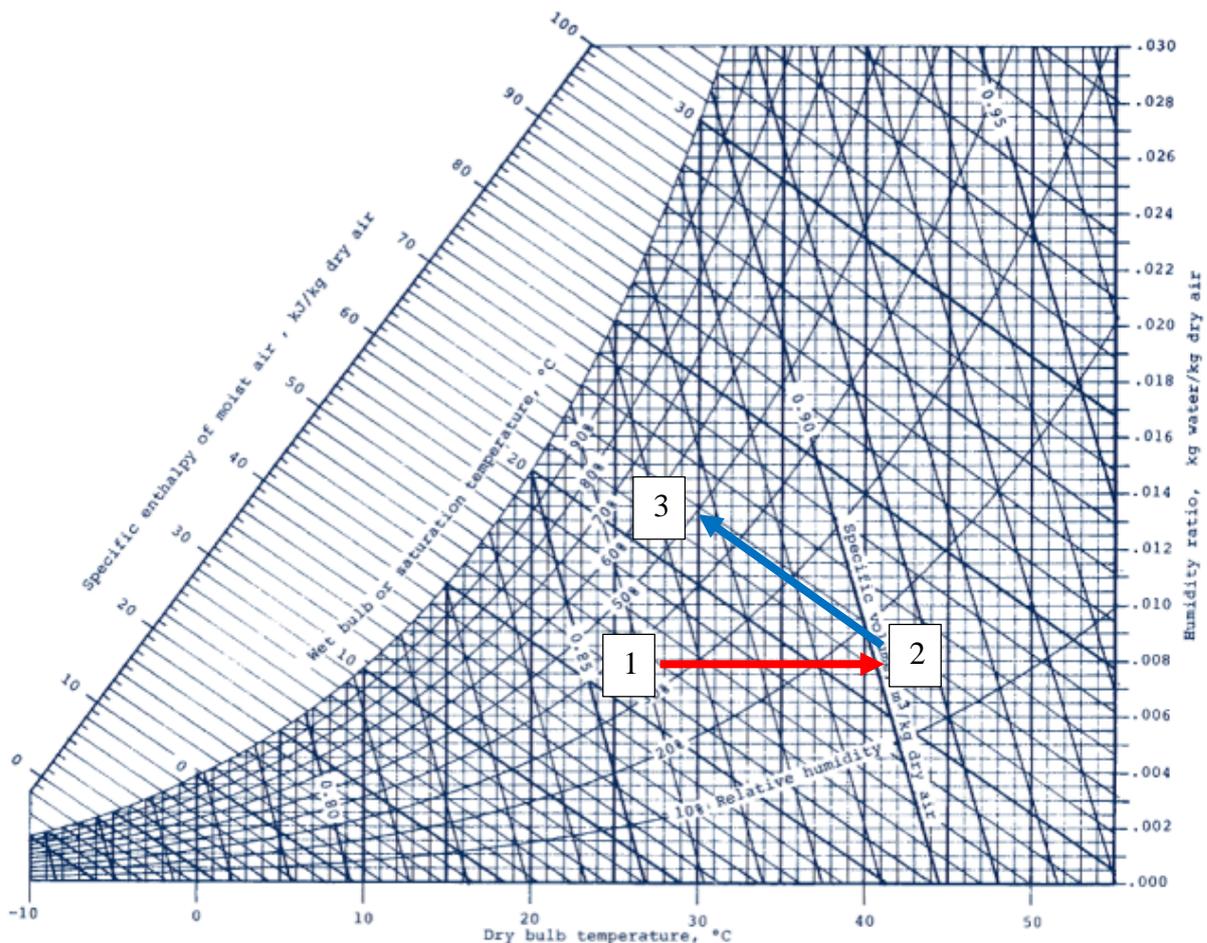
teruapkan, akan terjadi apabila aliran udara disekitar bagian pengeringan berjalan dengan baik.

4. Kelembaban Udara (RH)

Dalam batubara itu sendiri terdapat sejumlah air yang tidak dapat dihilangkan hanya dengan pengeringan udara panas, sejumlah air tersebut ialah keseimbangan kelembabab. Untuk setiap jenis batubara mempunyai batas keseimbangan kelembabannya masing-masing, nilai kadar air yang keluar dari batubara ini tersebut tidak dapat memiliki nilai kurang dari keseimbangan kadar air di batubara.

2.2.4 Psychrometric Chart

Psikometrik adalah salah satu bagian dari disiplin ilmu termodinamika yang mengkaji tentang sifat-sifat campuran udara dengan uap air seperti *dew point*, *enthalpy*, *specific volume*, *relative humidity*, *humidity ratio*, *dry bulb temperature* dan *wet bulb temperature*. Hal ini sangat penting mengingat bahwa udara atmosfer merupakan campuran udara dan uap air. Pada gambar 2.14 menunjukkan diagram psikrometrik dengan proses pengeringan pada T_{wb} konstan.

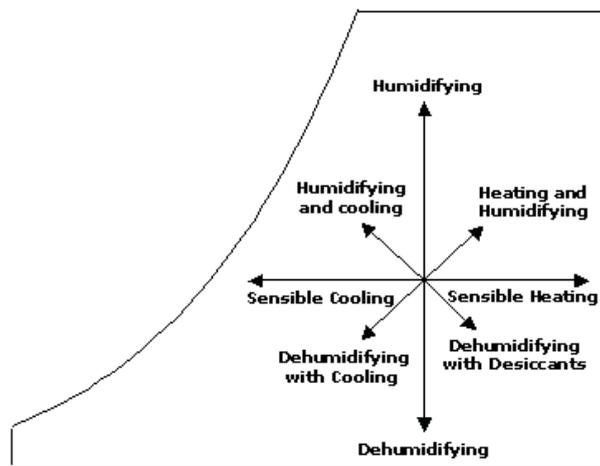


Gambar 2.14 Prinsip pengeringan pada diagram psikrometrik

Pada gambar 2.14 udara diasumsikan berada pada tiga kondisi yang berbeda. Ketiga kondisi tersebut adalah kondisi 1 merupakan udara pada keadaan ruang, kondisi 2 merupakan udara pada keadaan setelah dipanaskan oleh *heat exchanger*, dan kondisi 3 merupakan udara

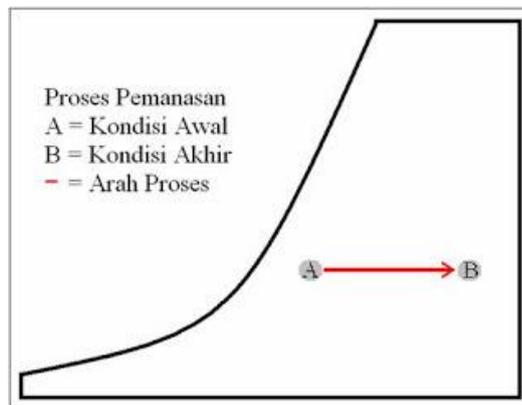
pada keadaan *outlet* dari *bed* batubara. Selain itu, udara juga dapat diilustrasikan mengalami 2 proses termodinamika selama melewati alat *coal dryer*. Proses pertama (1→2) adalah proses pemanasan (*heating*) yaitu proses pemanasan udara tanpa adanya perubahan *absolute humidity*. Secara fisis pada alat, proses ini merupakan keadaan udara sebelum dan setelah melewati *heat exchanger*. Proses kedua (2→3) adalah proses *humidifying* dan *cooling*. Proses *humidifying* terjadi karena uap air yang terdapat pada batubara telah menguap menuju udara penengring, dan menaikkan *absolute humidity* udara. Proses ini terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi massa uap air yang tinggi antara udara penengring dan partikel batubara. Proses *cooling* terjadi karena adanya perbedaan temperatur yang cukup tinggi antara permukaan partikel batuabra dan udara penengring.

Pada diagram psikrometrik dikenal 8 proses yang dialami oleh udara, berikut penjelasannya:



Gambar 2.15 Proses yang dialami oleh udara pada diagram psikrometrik

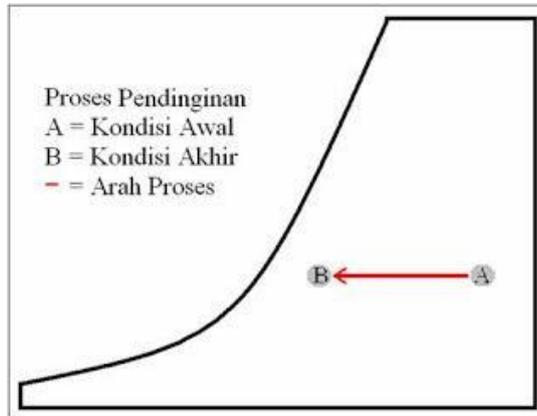
1. Proses Pemanasan (*heating*)



Gambar 2.16 Proses pemanasan

Gambar 2.16 menunjukkan proses pemanasan pada udara yang terjadi pada diagram psikrometrik. Proses pemanasan adalah proses penambahan kalo sensibel ke udara sehingga temperatur udara naik, pada proses ini rasio kelembaban dari udara akan tetap konstan. Sedangkan temperature *dry bulb* akan berubah. Proses pemanasan pada diagram psikrometrik ditunjukkan oleh garis mendatar ke kanan.

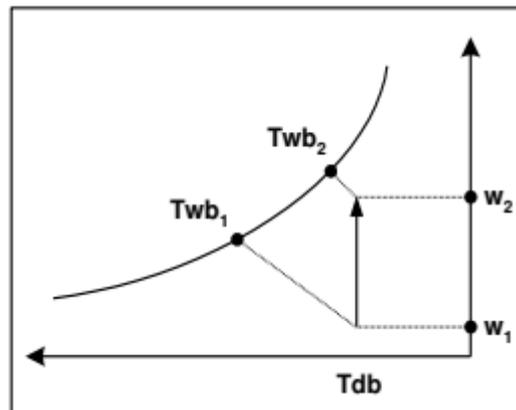
2. Proses Pendinginan (Cooling)



Gambar 2.17 Proses pendinginan

Untuk proses pendinginan terjadi proses pengambilan kalor sensibel dari udara menyebabkan suhu udara tersebut akan mengalami penurunan. Pada proses ini rasio kelembaban dari udara akan tetap konstan, sedangkan temperature dry bulb akan berubah. Proses ini tidak lain adalah kebalikan dari proses pemanasan. Proses pendinginan psikrometrik ditunjukkan dengan garis mendatar ke kiri.

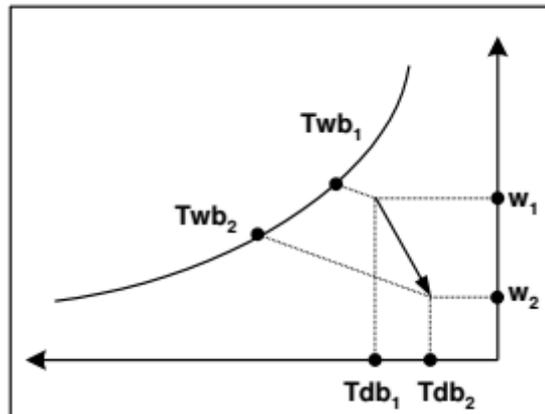
3. Proses Pelembaban (*humidifying*)



Gambar 2.18 Proses Pelembaban

Proses pelembaban adalah kondisi dimana terjadi penambahan kandungan uap air ke udara sehingga terjadi kenaikan entalpi dan rasio kelembaban. Pada proses ini terjadi perubahan kalor laten tanpa disertai perubahan kalor sensibel. Proses pelembaban pada psikrometrik diunjukkan dengan garis vertikal ke atas.

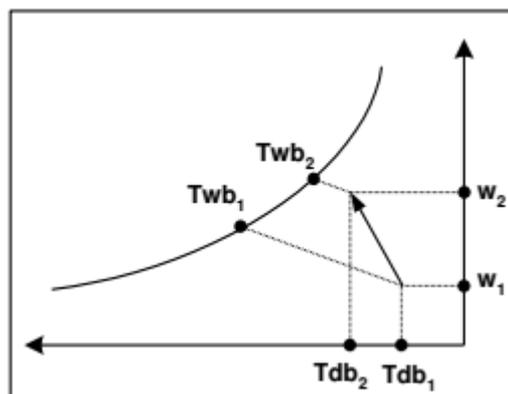
6. Proses Pemanasan dan Penurunan Kelembaban (*heating and dehumidifying*)



Gambar 2.21 Proses Pemanasan dan Penurunan Kelembaban

Pada gambar diatas ini ditunjukkan proses pemanasan dan penurunan kelembapan yang terjadi pada grafik *psychrometric*. Pada proses ini udara didinginkan terlebih dulu hingga temperaturnya berada dibawah titik embun udara, pada kondisi ini udara akan mengalami pengembunan dan menyebabkan kandungan uap air akan berkurang, kemudian udara dilewatkan melalui koil pemanas sehingga menyebabkan temperatur udara akan meningkat.

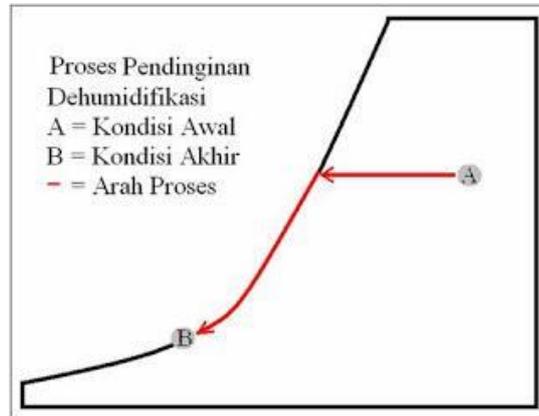
7. Proses Pendinginan dan Pelembaban (*cooling and humidifying*)



Gambar 2.22 Proses Pendinginan dan Pelembaban

Dalam proses ini dilakukan dengan melewati udara pada ruangan semburan air yang temperaturnya lebih rendah dari temperatur udara, tetapi lebih tinggi dari titik embun udara sehingga temperatur akan mengalami penurunan dan rasio kelembaban akan mengalami peningkatan.

8. Proses Pendinginan dan Penurunan Kelembaban (*cooling and dehumidifying*)



Gambar 2.23 Proses Pendinginan dan Penurunan Kelembaban

Pada gambar diatas ini merupakan proses pendinginan dan penurunan kelembaban pada diagram *psychrometric*. Proses ini adalah terjadi penurunan kalor laten dan kalor *sensibel*, dengan cara melewati udara pada koil pendingin atau ruangan semburan air dimana temperaturnya lebih rendah dari temperatur udara.

Dalam proses pengeringan dan pada diagram psikrometrik terdapat beberapa istilah yang sering digunakan antara lain:

1. Rasio Kelembaban (Humidity ratio)

Ratio kelembaban adalah massa dari uap air dibagi massa dari udara kering yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\omega = \frac{m_{\text{uap air}}}{m_{\text{udara kering}}}$$

dimana:

ω = rasio kelembaban (kg/kg)

mudara kering = massa dari udara kering (kg udara kering)

muap air = massa dari uap air (kg uap air)

2. Drying Rate

Drying rate adalah banyaknya air yang menguap pada suatu bahan pada penelitian kali ini yaitu batubara dalam waktu tertentu, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Drying Rate} = \frac{\Delta MC_{wb}}{\Delta t}$$

dimana:

ΔMC_{wb} = kadar air suatu bahan basah

Δt = waktu

3. Fraksi Massa

Fraksi massa adalah perbandingan antara massa dari uap air dengan massa dari uap air ditambah dengan massa dari udara, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Y = \frac{m_{\text{uap air}}}{m_{\text{uap air}} + m_{\text{udara kering}}}$$

dimana:

Y = Fraksi Massa

$m_{\text{uap air}} = \text{massa uap air (kg)}$

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

4. Kelembaban Relatif (*Relative Humidity*)

Kelembaban relatif merupakan perbandingan dari fraksi molekul uap air didalam udara basah dengan fraksi molekul uap air jenuh pada tekanan dan temperatur yang sama, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{P_{\text{uap air}}}{P_{\text{jenuh}}} \times 100\%$$

dimana:

ϕ = Kelembaban relatif

$P_{\text{uap air}}$ = tekanan uap air (kPa)

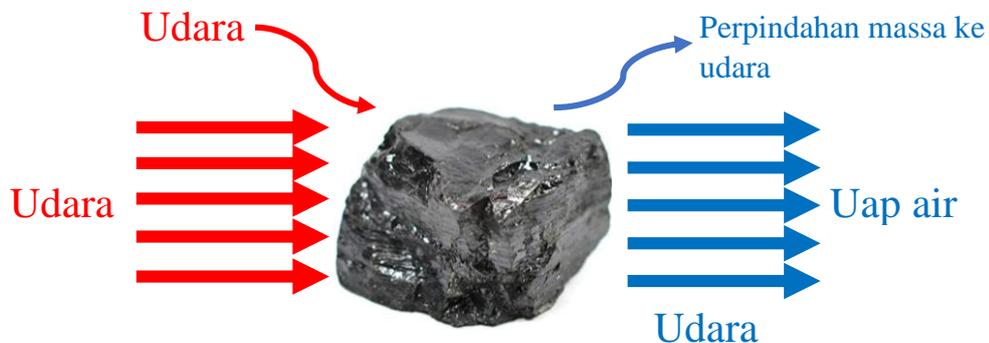
P_{jenuh} = massa jenuh uap air (kPa)

2.2.5 Perpindahan Panas dan Massa

Pada proses pengeringan akan terjadi perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering. Perpindahan massa yang terjadi selama proses pengeringan, yaitu:

1. Perpindahan uap air dari bagian dalam batubara menuju bagian permukaan batubara.
2. Perpindahan uap air dari bagian permukaan batubara teruapkan ke udara pengering.

Konsentrasi air pada bagian dalam batubara lebih besar dibandingkan dengan permukaan dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi antara bagian dalam batubara dengan bagian permukaan batubara.



Gambar 2.24 Proses Pengeringan Batubara

Penguapan adalah proses dimana zat cair diubah menjadi gas, penguapan juga memiliki arti konversi dari zat cair ke uap dibawah suhu didih cairan. Proses perubahan molekul di dalam keadaan cair contohnya air, dengan spontan menjadi gas contohnya uap air. Proses ini adalah kebalikan dari kondensasi, umumnya penguapan dapat dilihat dari lenyapnya cairan secara berangsur-angsur ketika terpapar dengan gas pada volume signifikan. Berikut ini merupakan beberapa faktor yang memengaruhi kecepatan penguapan zat cair adalah:

1. Luas permukaan dari zat cair, lepasnya molekul zat cair tidak dapat berlangsung secara serentak akan tetapi bergiliran dimulai dari permukaan zat cair yang punya kesempatan terbesar untuk penguapan. Dengan demikian memperluas permukaan zat cair dapat mempercepat penguapan yang akan terjadi.

2. Pengurangan tekanan udara pada permukaan zat cair berarti jarak antar partikel udara diatas zat cair tersebut menjadi lebih renggang. Dengan memperkecil tekanan udara pada permukaan zat, berakibat jarak antar molekul udara menjadi besar. Hal ini mengakibatkan molekul-molekul pada permukaan zat cair akan berpindah ke udara diatasnya sehingga mempercepat proses penguapan. Akibatnya molekul air lebih mudah terlepas dari kelompoknya dan mengisi ruang kosong antara partikel-partikel udara tersebut.
3. Gerakan udara yang lebih cepat akan memindahkan lebih banyak uap air dan lebih cepat laju penguapannya. Tapi terdapat faktor yang bertentangan, sebagai contoh kecepatan udara yang sangat cepat akan mendinginkan air, dimana mengurangi tekanan uap dan kecepatan penguapan.

Perpindahan yang terjadi pada proses pengeringan batubara adalah perpindahan massa dari bagian permukaan batubara menuju ke udara pengering secara konveksi. Karena perpindahan massa terjadi secara konveksi, maka untuk laju perpindahan molar dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Dan untuk laju perpindahan massa secara konveksi, dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

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

dimana:

N''_A = laju perpindahan molar

n''_A = laju perpindahan massa

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

$C_{A,S}$ = konsentrasi uap air dibagian permukaan bahan ($\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{m}^3$)

$\rho_{A,\infty}$ = rapat massa uap air di medium pengering (kg/m^3)

$\rho_{A,S}$ = rapat massa uap air dibagian permukaan bahan (kg/m^3)

A = luas dari bahan (m^2)

h_m = koefisien konveksi perpindahan massa (m/s)

Pada proses pengeringan bahan dilakukan dengan mensirkulasikan udara panas yang dianggap suatu proses adiabatik. Oleh karena itu panas yang dibutuhkan bahan untuk menguapkan air yang terkandung didalamnya berasal dari udara pengering. Uap yang teruapkan dari bahan akan menuju permukaan bahan yang kemudian akan menguap dan bercampur dengan udara pengering. Perpindahan massa uap air dari bahan ke udara ini dapat dikaitkan dengan persamaan Sherwood sebagai berikut:

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D_{AB}}$$

Bilangan Sherwood ini didapat dari nilai fungsi bilangan Schmith dan bilangan Reynold. Hubungan keduanya dinyatakan sebagai berikut:

$$Sh = f(x^*, Re_L) Sc^n$$

Nilai *Schmith Number* adalah perbandingan antara momentum dan difusivitas massa. Hubungan keduanya dapat dinyatakan kedalam persamaan sebagai berikut:

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}}$$

dimana:

h_m = koefisien konveksi perpindahan massa (m/s)

D_{AB} = difusivitas

L = panjang permukaan

Sedangkan untuk nilai bilangan Reynold dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}$$

dimana:

Re = *reynold number*

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

ρ = massa jenis udara pengering (kg/m^3)

μ = viskositas absolut udara pengering (m^2/s)

D = diameter batubara (m)

Persamaan diatas dapat digunakan untuk menghitung *Nusselt Number* seperti pada persamaan berikut:

$$Nu = f(x^*, Re) Pr^n$$

Nilai dari koefisien perpindahan panas konveksi berbanding lurus dengan *Nusselt Number* dimana ditunjukkan dalam persamaan dibawah ini:

$$h = \frac{Nu_D K_f}{L}$$

Hubungan yang terjadi yaitu antara luasan permukaan (L) dengan koefisien perpindahan panas (h) saling berbanding terbalik, semakin besar luasan permukaannya maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan panasnya.

dimana:

K = konduktivitas termal (J/kg.K)

h = koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2\text{K}$)

L = panjang karakteristik

Rumus untuk proses evaporasi dari kesetimbangan energi yaitu besar energi kalor yang dilepaskan oleh udara pengering sama dengan kalor yang diterima pada bagian permukaan batubara.

$$Q_{batubara} = Q_{udara pengering}$$

$$m_{batubara} \cdot C_{pbatubara} \cdot \Delta T_{batubara} = m_{udara} \cdot C_{pudara} \cdot \Delta T_{udara}$$

dimana:

- $Q_{batubara}$ = kalor dalam batubara
 $Q_{udara pengering}$ = kalor dalam udara panas (udara pengering)
 $m_{batubara}$ = massa dari batubara (kg)
 m_{udara} = massa dari udara panas (kg)
 $C_{pbatubara}$ = panas spesifik dari batubara (J.kg/K)
 C_{pudara} = panas spesifik dari udara (J.kg/K)
 $\Delta T_{batubara}$ = panas spesifik dari batubara (K)
 ΔT_{udara} = panas spesifik dari udara (K)

Pada proses pengeringan ini hubungan antara dua koefisien konveksi yang saling simultan ketika terjadi perpindahan massa dan panas. Ketika keadaan *steady* panas yang bergerak dalam udara pengering berguna untuk menguapkan air yang terkandung dalam batubara untuk menjadi uap air.

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

dimana:

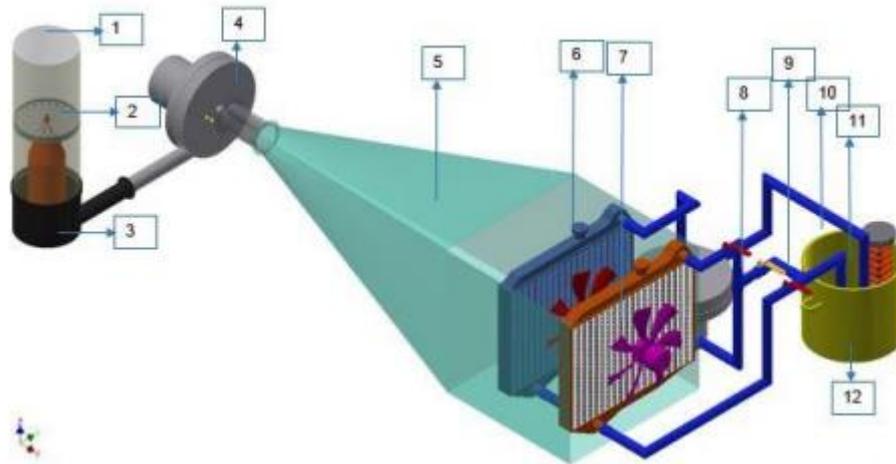
- q = laju perpindahan panas (W)
 A = luas permukaan benda (m²)
 h = koefisien konveksi (W/m².K)
 T_∞ = temperatur permukaan material (K)
 T_s = temperatur infinity (K)

BAB III

METODOLOGI

3.1 Metode Eksperimen

Penelitian dilakukan dengan dasar pada eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya oleh Alim Jabbar (2017). Tipe model alat ini didesain untuk material dengan bentuk bola (granular) contohnya seperti batubara. Model bed pengeringan yang digunakan pada eksperimen sebelumnya hanya berbentuk *single row blade*, pada eksperimen kali ini akan digunakan dua jenis bed pengeringan yaitu *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5mm dan *single row bed* dengan kemiringan sudut sebesar 20°. Alat ini didesain untuk mengeringkan batubara dengan udara sebagai media pengering. Udara yang digunakan memiliki suhu $\pm 50^{\circ}\text{C}$. batubara yang digunakan pada eksperimen kali ini memiliki diameter ± 4.75 mm dan berbentuk bola. Instalasi skema peralatan eksperimen ditunjukkan pada gambar 3.1 dibawah ini.

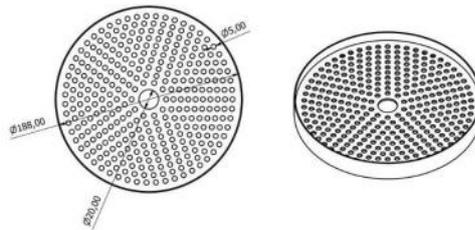


Gambar 3.1 Instalasi Alat Eksperimen

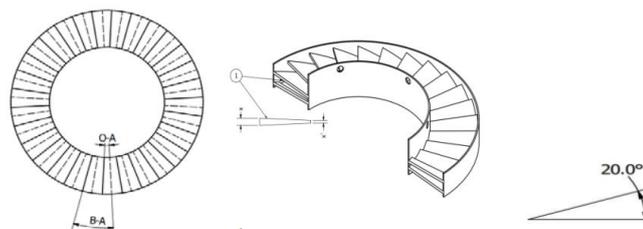
Keterangan:

1. Dinding *drying chamber*
2. *Drying bed*
3. *Body* bawah
4. *Centrifugal blower*
5. Pengarah udara
6. Radiator
7. Kipas radiator
8. Kran saluran
9. Saluran air radiator ke drum
10. Saluran air drum ke radiator
11. *Heater*
12. Drum

Pada eksperimen kali ini batubara didalam *drying chamber* akan dikeringkan dalam rentang waktu yang telah ditentukan. Udara pengering diambil dari udara disekitar alat pengeringan atau udara lingkungan yang dipanaskan oleh sistem pemanas udara. Pemanas udara menggunakan *compact heat exchanger*, dimana udara yang telah dipanaskan akan dialirkan kedalam *drying chamber* melewati selongsong dengan menggunakan *blower*. Pemanas udara yang digunakan adalah jenis *compact heat exchanger* (radiator) yang bertujuan untuk menaikkan suhu udara inlet atau dengan kata lain sebagai *air heater*. Laju pengeringan pada batubara dapat diketahui dengan memasang sebuah alat yaitu RH meter. RH meter dapat mendeteksi *relative humidity* dan temperatur pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber*. Selanjutnya RH meter disambungkan pada software Elitech Log Win V6.2.0 yang akan ditampilkan pada layar komputer untuk mengetahui nilai temperatur dan *relative humidity* yang terdeteksi oleh RH meter tersebut. Bed pengeringan diletakan pada sisi tengah *drying chamber*. Besarnya diameter dan kemiringan pada bed pengeringan itu yang akan memengaruhi kecepatan udara yang melalui plate tersebut. Kecepatan udara pengering diukur menggunakan anemometer ketika *drying bed* dipasang pada *chamber*. Alat eksperimen ini berskala laboratorium, untuk kedepannya diharapkan alat ini dapat digunakan sebagai penunjang sistem yang sudah berjalan pada sistem pembangkit guna meingkatkan nilai kalor dari suatu batubara. Profil *perforated plate* dan *single row blade* pada *bed coal dryer* ditunjukkan pada gambar di 3.2 dan 3.3.



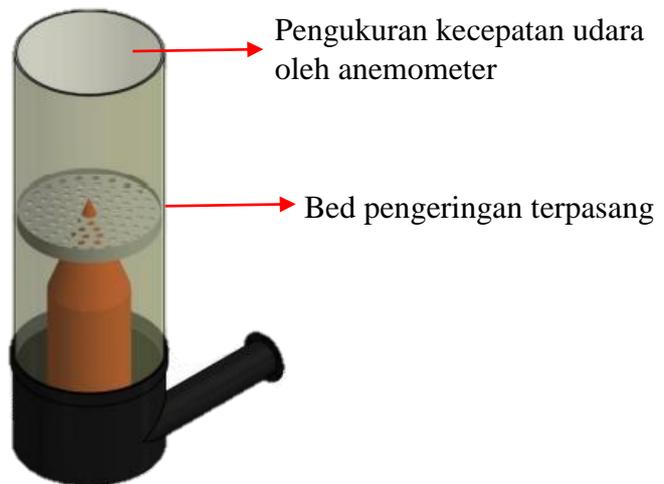
Gambar 3.2 Profil *Perforated plate*



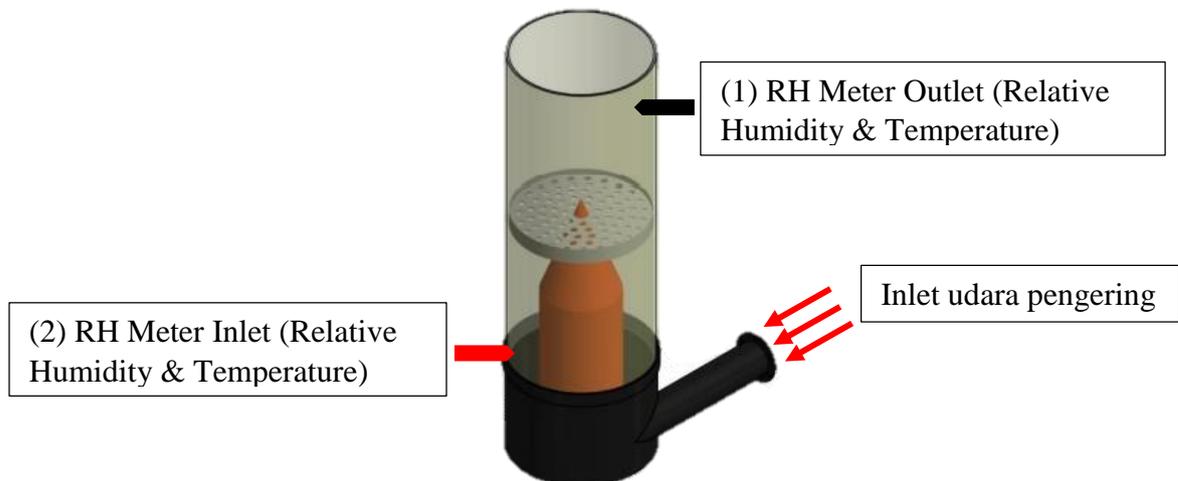
Gambar 3.3 Profil *Singe Row Blade*

3.1.1 Skema Peletakan Alat Ukur dan Pengambilan Data

Pada eksperimen yang akan dilakukan, terdapat beberapa data yang akan diambil yaitu temperature dan *relative humidity* pada *inlet* dan *outlet drying chamber* dan pada *inlet fan radiator*, serta temperatur air pada *drum* yang dipanaskan oleh *heater*. Pengukuran kecepatan udara pengering dilakukan dengan mengatur voltase *centrifugal blower* menggunakan *voltage regulator* kemudian mengukur kecepatan udara menggunakan anemometer pada *drying chamber* saat *drying bed* terpasang.



Gambar 3.4 Skema Peletakan Alat Pengukur Kecepatan Udara Pengering



Gambar 3.5 Skema Peletakan RH Meter

Pada posisi (1) dipasang RH meter Elitech RC 4HC untuk membaca temperature dan nilai relative humidity dari udara pengering yang masuk ke drying chamber dari selongsong. Pada posisi (2) dipasang RH meter Elitech RC 4HC untuk membaca temperature dan nilai relative humidity dari udara pengering yang telah melewati batubara.

3.1.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian kali ini diperlukan variabel-variabel terkait, tujuannya agar penelitian yang dilakukan mempunyai arah dan tujuan yang jelas terkait data yang akan dicari dalam suatu penelitian. Berikut merupakan variabel-variabel yang akan digunakan pada penelitian kali ini.

1. Variabel Bebas

- Lubang pada *perforated plate* dan sudut pada *single row blade*
 Besar lubang yang terdapat di *perforated plate* adalah 5 mm dan besar sudut pada *single row blade* yang digunakan adalah 20°.

- *Volt Centrifugal blower*
Voltage input centrifugal blower ditentukan dengan menggunakan voltage regulator yang terhubung dengan input power dari sentrifugal blower. Penentuan besar volt dilakukan dengan mengkalibrasi voltage regulator terhadap sentrifugal blower dengan menggunakan alat ukur kecepatan udara, yaitu anemometer.
- *Beban Pengeringan Batubara*
Beban pengeringan batubara divariasikan masing masing pada 3 nilai, yaitu sebesar 200gr, 400 gr dan 600 gr.

2. Variabel Terkontrol

- *Temperatur inlet udara pengering*
Temperatur udara *inlet fluidized bed* diatur tetap pada temperatur 50°C. Pengendalian temperatur dilakukan dengan penggunaan *thermocontrol* yang diletakkan pada tangki air. Pengaturan temperatur *inlet* udara pengering ini tercapai dengan menjaga temperatur air (fluida panas pada sisi *tube heat exchanger*) pada temperatur $\pm 70^\circ\text{C}$.
- *Diameter batubara*
Batubara dipecahkan hingga berbentuk menyerupai granular dengan ukuran diameter rata rata $\pm 4,75$ mm.
- *Dimensi Peralatan Eksperimen*
Peralatan eksperimen ini terdiri dari berbagai alat antara lain:
 - a) tangki air
 - b) chamber pengeringan (diameter luar = 199,5 mm; diameter dalam = 198 mm; dan tinggi dinding chamber = 1,5 mm)
 - c) *compact heat exchanger* dengan dua buah kipas
 - d) sistem perpipaan air
 - e) ducting aliran udara.

Keseluruh peralatan pada sistem bed coal dryer memiliki dimensi yang tetap selama proses eksperimen berjalan.

3.2 Peralatan Penunjang Eksperimen

Berikut merupakan beberapa peralatan penunjang yang akan digunakan dalam pelaksanaan eksperimen

1. *Thermocouple*
Thermocouple dipasang pada heat exchanger untuk mengetahui temperatur air pemanas. Thermocouple yang digunakan dalam eksperimen ini adalah 2 thermocouple tipe K dengan range -200°C hingga 1800°C yang berada pada sisi inlet dan outlet heat exchanger.
2. *Data Logger*
Dibutuhkan data akusisi sebagai pembaca temperature yang terdeteksi oleh *thermocouple*. Data mengenai besarnya temperatur akan ditampilkan pada layar AT45xx *Multi-channel Temperature Meter*. Kemudian data tersebut akan disimpan pada *flashdisk* ketika proses perekaman dimulai dan dapat dibaca oleh *computer* saat proses perekaman data dihentikan dan *flashdisk* dihubungkan ke *computer*. AT45xx *Multi-channel Temperature Meter* ini memiliki 8 *channel* yang dapat diextend menjadi 128 *channel*.

3. RH meter



Gambar 3.6 RH Meter Elitech Tipe RC-4HC

RH meter merupakan alat untuk mengetahui nilai *relative humidity* udara pengering pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber* serta sisi *inlet fan radiator*. RH meter yang digunakan pada eksperimen ini adalah produk dari Elitech tipe RC-4HC. Pada alat ini, besarnya nilai *relative humidity* dan *temperature* dapat terbaca ketika RH meter disambungkan ke *computer* menggunakan kabel usb dan aplikasi data logger berupa ElitechLogWin V6.2.0 dibuka. Karena alat ini juga menampilkan nilai *temperature*, maka tidak diperlukan lagi *thermocouple* pada *inlet* dan *outlet drying chamber*.

4. Anemometer

Anemometer merupakan alat untuk mengetahui nilai kecepatan udara pada sisi *outlet chamber* yang telah di kalibrasikan dari besarnya kecepatan udara yang diatur oleh *voltage regulator* pada sentrifugal *blower*.

5. Toolkit



Gambar 3.7 Toolkit yang Digunakan

Toolkit yang digunakan dalam eksperimen ini adalah tang, gunting dan palu sangat dibutuhkan pada eksperimen ini untuk tahap persiapan dan separasi instalasi seperti, separasi cerobong, perangkaian *thermocontrol*, dan proses pemecahan dan penyaringan batubara.

6. *Heater*



Gambar 3.8 *Heater*

Heater berfungsi sebagai pemanas air aquades hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Pada eksperimen ini, mula-mula digunakan 3 *heater* untuk memanaskan aquades hingga temperatur mendekati 70°C, kemudian digunakan 1 *heater* untuk menjaga temperatur aquades tetap berada pada *range* $\pm 70^{\circ}\text{C}$

7. *Voltage Regulator*

Voltage Regulator merupakan alat untuk mengatur *voltage input* pada sentrifugal *blower* sehingga kecepatan udara yang dihasilkan dapat terkalibrasi dengan anemometer. Pada eksperimen ini, *voltage regulator* yang digunakan adalah merk Matsunaga MFG. CO. LTD tipe *Delux Slide Regulator*.



Gambar 3.9 *Voltage Regulator*

8. Timbangan Beban dan Timbangan Digital



Gambar 3.10 Timbangan Beban dan Timbangan Digital

Timbangan digunakan untuk mengukur massa batubara yang akan dikeringkan tiap kali 1 percobaan. Timbangan yang digunakan untuk mengukur massa batubara ini adalah timbangan beban dengan range beban 0 s/d 2 kg. Dalam eksperimen ini, akan diambil beberapa kali sampel batubara saat dimulainya pengeringan dalam range waktu tertentu sehingga digunakan juga timbangan digital dengan range 0,001-200 gram untuk mengukur massa sampel batubara tersebut. Timbangan digital juga digunakan untuk mengetahui besarnya massa batubara yang telah dikeringkan menggunakan oven.

9. Oven



Gambar 3.11 Oven

Sampel batubara yang telah dikeringkan menggunakan *bed coal dryer* selanjutnya akan dikeringkan kembali menggunakan oven dengan temperatur 105°C selama 180 menit untuk menghitung *moisture content* yang terdapat pada batubara.

3.3 Urutan Pelaksanaan Penelitian

3.3.1 Persiapan Alat

1. Mempersiapkan dan memastikan peralatan eksperimen berada dalam kondisi baik.

2. Memecahkan batubara hingga berbentuk bulat. Kemudian batubara disaring menggunakan ayakan berukuran $\pm 4,4$ mm untuk mendapatkan ukuran batubara dengan rata-rata $\pm 4,75$ mm.
3. Menimbang batubara menggunakan timbangan beban yaitu dengan massa sebesar 400 gram untuk setiap variasi. Pada eksperimen ini akan dilakukan 2 variasi lubang *bed* pengeringan yaitu *perforated plate* dengan diameter 5 mm dan *single row blade* dengan sudut 20° . Selanjutnya juga dilakukan tiga variasi beban pengeringan dengan nilai sebesar 200 gr, 400 gr dan 600 gr.
4. Melakukan perhitungan kecepatan minimum fluidisasi dengan menggunakan persamaan *drag force* sama dengan *W*.
5. Mengukur kecepatan hembusan angin yang diatur *voltage regulator* menggunakan anemometer saat *drying bed* terpasang.
6. Memastikan *thermocouple* terpasang pada titik-titik yang telah ditentukan, sensor dapat terdisplay pada layar perangkat AT45xx *Multi-channel Temperature Meter* dengan *usb flashdisk* yang sudah disambungkan ke perangkat tersebut dan data sudah mulai direkam.
7. Memastikan RH meter sudah dapat merekam data dengan mengatur parameter terlebih dahulu pada *computer* melalui *software* ElitechLogWin V6.2.0, kemudian RH meter dipasang pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber* serta *inlet fan radiator*.
8. Mengisi tangki air dengan aquades kemudian panaskan aquades menggunakan 3 *heater* pada awal sebelum pengambilan data, kemudian matikan 2 *heater* saat mulai dilakukannya pengambilan data untuk menjaga *temperature* aquades tidak melebihi 70°C .
9. Menyalakan pompa air untuk mensirkulasikan air aquades yang telah dipanaskan menuju *heat exchanger*. Kemudian menyalakan kipas untuk mensirkulasikan udara menuju *heat exchanger* sehingga terjadi perpindahan panas antara aquades dan udara.
10. Menyalakan blower pada kecepatan tertentu dengan mengatur voltase pada *voltage regulator* sesuai dengan perhitungan kecepatan minimum fluidisasi dan kecepatan yang telah diukur menggunakan anemometer.

3.3.2 Pengambilan Data

1. Setelah alat sudah dipersiapkan, pastikan untuk menunggu hingga temperatur udara pada inlet drying chamber bernilai 50°C .
2. Sebelum melakukan proses pengeringan, nilai temperature dan relative humidity pada sisi inlet drying chamber dicatat terlebih dahulu.
3. Sebelum mulai percobaan, ambil sampel butiran batubara sebanyak ± 5 gram sebagai sampel batubara ke-0.
4. Masukkan butiran batubara sejumlah 400 gram setelah temperatur udara mencapai angka 50°C .
5. Pengambilan sampel batubara dilakukan dengan interval waktu 1 menit selama 5 kali kemudian dengan interval waktu 2 menit untuk pengambilan data ke 6 hingga ke 10. Selanjutnya setiap sampel yang telah diambil dimasukkan ke dalam plastik klip yang diberi keterangan untuk menjaga moisture content pada sampel batubara.
6. Catat besarnya temperatur dan relative humidity pada sisi outlet drying chamber untuk setiap pengambilan sample batubara.
7. Setelah pengambilan data selesai dilakukan, pastikan kompor, blower, pompa, kipas, dan heater dalam keadaan nonaktif. Kemudian instalasi dirapikan sesuai dengan kondisi semula.

8. Menimbang dan memasukan masing-masing sampel batubara pada alumunium foil dengan tanda tertentu untuk dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 105°C selama 180 menit (ASTM D5142) untuk menghilangkan moisture content pada batubara secara keseluruhan.
9. Setelah sampel dikeringkan dengan oven, timbang masing-masing sampel menggunakan timbangan digital.
10. Selesai.

3.3.3 Analisis Data Eksperimen

Setelah proses pengambilan data dilaksanakan, selanjutnya adalah pengolahan data. Hal yang akan ditinjau yaitu dari segi udara dan segi batubara, dengan masing-masing variabel yang akan didapatkan dari hasil percobaan. Berikut adalah bagan mengenai hal yang akan ditinjau. Pada tahap pengolahan data, dari sisi udara akan didapatkan variabel $T_{db\ out}$, $T_{db\ in}$, Rh_{out} , Rh_{in} . Dari variabel-variabel tersebut bisa didapatkan proses yang terjadi dalam psychrometric chart. Sedangkan dari sisi batubara akan didapatkan variabel $M_{batubara\ kering}$, $M_{batubara\ basah}$. Dari variabel-variabel tersebut akan didapatkan grafik *moisture content* fungsi waktu dan laju pengeringan fungsi waktu.

3.3.4 Lembar pengambilan data

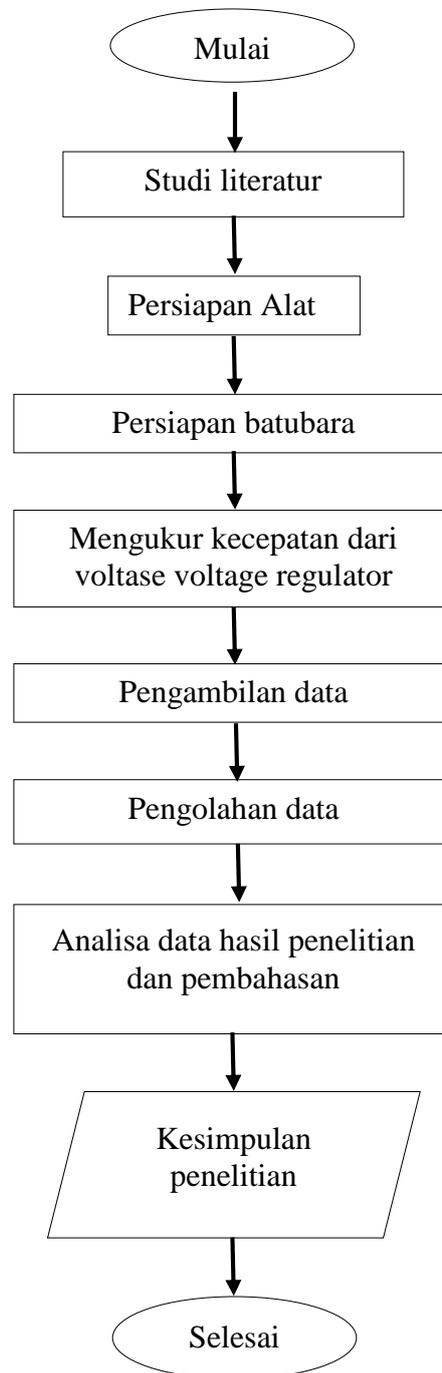
Berikut merupakan lembar data yang akan digunakan dalam pengambilan data pada eksperimen ini

No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0						
2	1						
3	2						
4	3						
5	4						

Tabel 3.1 Lembar Pengambilan Data

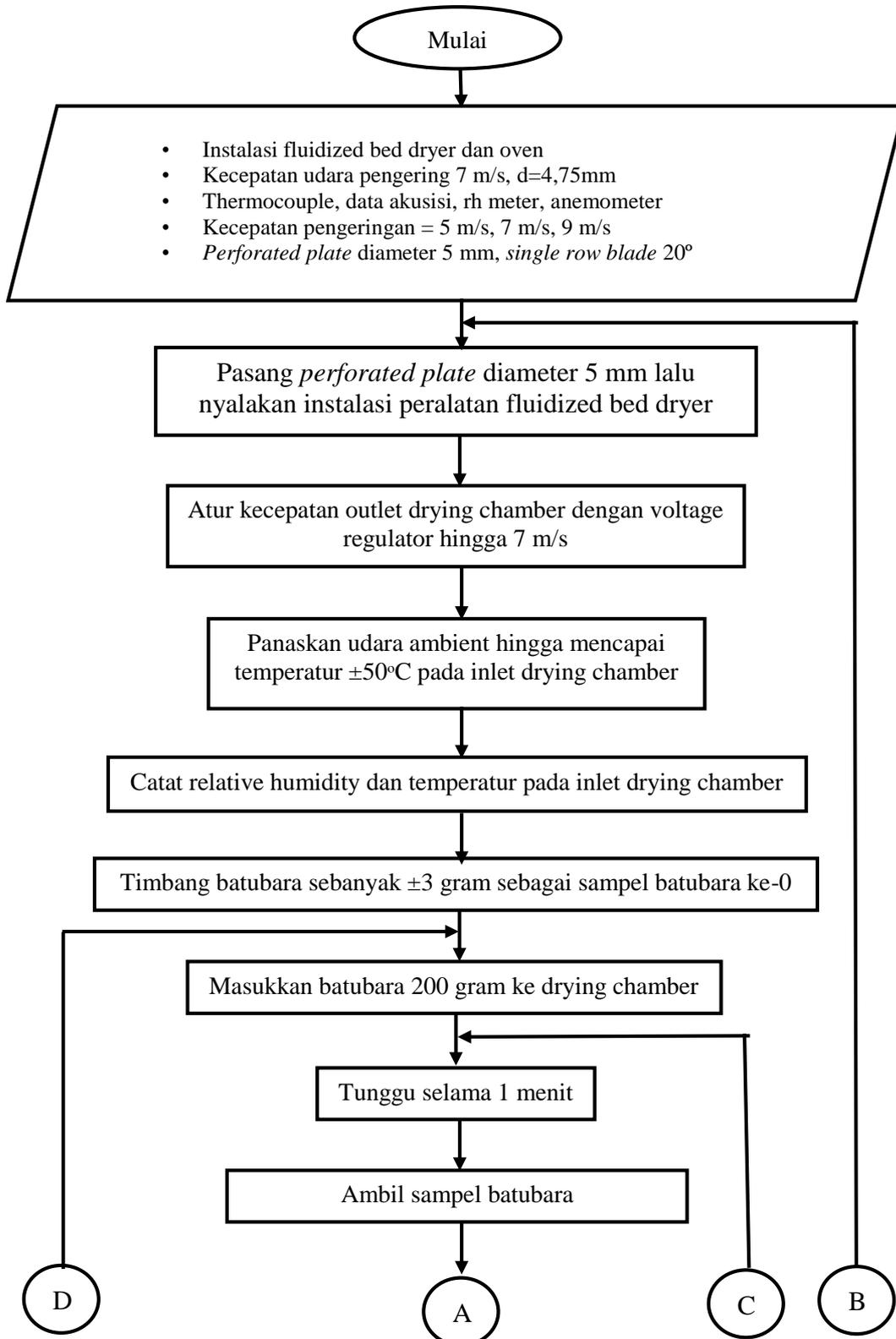
3.3.5 Flowchart Penelitian

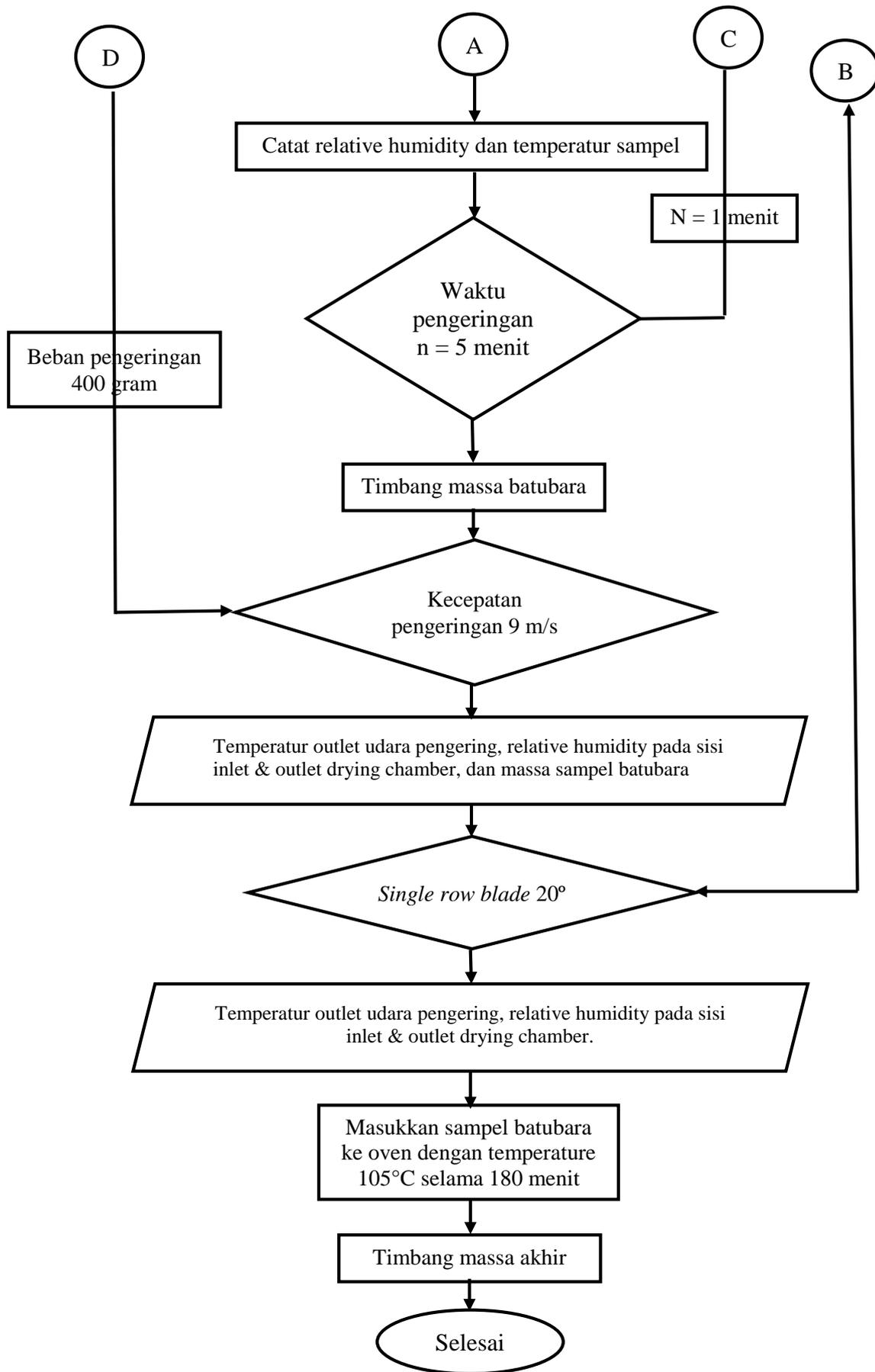
Berikut ini merupakan alur tahapan penelitian yang dilakukan pada eksperimen kali ini.



3.3.6 Flowchart Eksperimen

Berikut ini merupakan alur tahapan yang dilakukan pada eksperimen kali ini. .





3.3.7 Jadwal Kegiatan

Kegiatan	Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■																
Persiapan Alat					■	■	■	■	■															
Penulisan Proposal TA									■	■	■	■	■	■	■	■								
Pengujian Alat (Trial)									■	■	■	■	■	■	■	■								
Seminar Proposal TA																	■	■	■	■				
Penambihan Data																		■	■	■				
Pengolahan Data																		■	■	■				
Sidang TA																								■

Tabel 3.2 Jadwal Kegiatan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen

Data hasil pengukuran yang telah didapatkan dari eksperimen pengeringan batubara ini adalah massa basah batubara, massa kering batubara, temperature inlet dan outlet chamber, serta relative humidity pada inlet dan outlet drying chamber. Data hasil eksperimen secara lengkap terlampir pada lampiran laporan tugas akhir ini.

4.2 Analisa dan Contoh Perhitungan

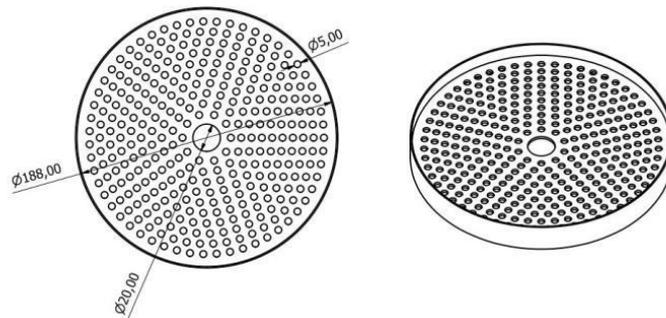
4.2.1 Perhitungan *Flow Open Area* pada Bed Pengeringan

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

Untuk mendapatkan nilai laju massa aliran udara, perlu dihitung terlebih dahulu luasan *flow open area* pada *perforated plate* dan kecepatan minimum fluidisasi yang digunakan sebagai batas kecepatan yang akan digunakan. Perhitungan laju massa aliran udara untuk jenis bed pengeringan *perforated plate* diameter 5mm dan *single row blade* dengan sudut 20° ditunjukkan sebagai berikut:

- ***Flow Open Area* pada *Perforated Plate***

Bentuk perforated yang digunakan pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar 4.1, luasan *flow open area* pada plate merupakan jumlah lubang luasan area/bidang yang dilewati udara pengering.



Gambar 4.1 Dimensi *Perforated plate* diameter 5 mm

Dengan nilai diameter lubang pada *perforated plate* yang telah diketahui maka nilai dari *flow open area* yaitu sebagai berikut:

Jumlah lubang = 325 buah

$$L_{\text{lubang perforated}} = \left[\frac{\pi}{4} \times d_{\text{perforated plate}}^2 \right]$$

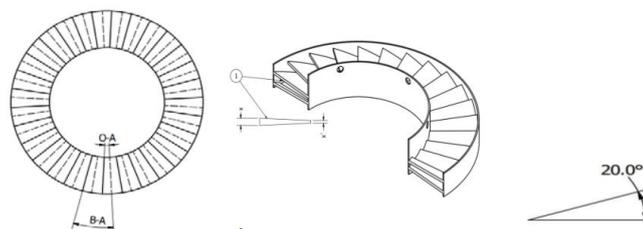
$$L_{\text{lubang perforated}} = \left[\frac{\pi}{4} \times 5^2 \right] = 19,6 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{perforated}} = L_{\text{lubang}} \times \text{Total Lubang}$$

$$A_{\text{perforated}} = 19,6 \times 325 = \mathbf{6370 \text{ mm}^2}$$

- **Flow Open Area pada Single row blade**

Luas penampang *single row blade* yang digunakan dihitung pada bidang tegak lurus vektor kecepatan udara pengering yang telah diarahkan oleh vane pengarah aliran dengan sudut 20°. Gambar 4.2 menunjukkan dimensi dari *single row blade*.



Gambar 4.2 Dimensi *Perforated plate* dengan sudut 20°

$$L_{\text{vane}} = \frac{\pi}{4} \times (d_{\text{out vane}}^2 - d_{\text{in vane}}^2)$$

$$L_{\text{vane}} = \frac{3,14}{4} \times (188,5 \text{ mm}^2 - 105 \text{ mm}^2) = 19238,19125 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{single row blade}} = (L_{\text{vane}} - (\text{Total Plate} \times \text{tebal} \times (d_{\text{out vane}} - d_{\text{in vane}}))) \times \sin 20$$

$$A_{\text{single row blade}} = (19238,19125 \text{ mm}^2 - (30 \times 1 \text{ mm} (188,5 \text{ mm} - 105 \text{ mm}))) \times \sin 20$$

$$A_{\text{single row blade}} = (19238,19125 \text{ mm}^2 - 2505 \text{ mm}^2) \times \sin 20 = \mathbf{5723,088 \text{ mm}^2}$$

4.2.2 Perhitungan Kecepatan Minimum Fluidisasi

Kecepatan minimum fluidisasi merupakan kecepatan minimum dari udara pengering agar batubara dapat terangkat/mengambang selama proses pengeringan berlangsung, sehingga nilai kecepatan minimum fluidisasi digunakan sebagai acuan untuk kecepatan dari udara pengeringan agar nilainya tidak melebihi. Kecepatan minimum fluidisasi diperoleh dengan menggunakan hukum kesetimbangan gaya.

$$\sum F_y = 0$$

$$Fd - W = 0$$

$$Fd = W$$

$$\frac{1}{2} Cd \rho_{udara} V^2 A = \rho_{batubara} \forall g$$

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2 \rho_{batubara} \forall g}{Cd \rho_{udara} A}}$$

Dengan asumsi batubara berbentuk bola dengan diameter 4,75 mm maka,

$$\rho_{udara} = 1,084 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{batubara} = 1450 \text{ kg/m}^3$$

$$Cd_{bola} = 0,47$$

$$\forall = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3,14 \times (2,375 \times 10^{-3})^3 \text{ m}^3 = 0,561 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$A_{bola} = 4 \pi r^2 = 4 \times 3,14 \times (2,375 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2 = 0,708 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{batubara} \times \forall \times g}{Cd_{bola} \times \rho_{udara} \times A}}$$

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2 \times 1450 \times 0,561 \times 10^{-7} \times 9,81}{0,47 \times 1,084 \times 0,708 \times 10^{-4}}}$$

$$V_{min} = 6,652 \text{ m/s} \approx 7 \text{ m/s}$$

4.2.3 Perhitungan Mass Flow Rate Udara Pengering

Berdasarkan hasil perhitungan luasan flow area dan kecepatan udara, maka dapat diperoleh nilai laju massa aliran udara dengan persamaan berikut:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A_c$$

Dari perhitungan didapatkan kecepatan minimum sebesar 7 m/s, untuk menghitung laju aliran massa kecepatan yang digunakan merupakan kecepatan rata-rata dari pengukuran dengan menggunakan alat anemometer. Berikut merupakan contoh perhitungan laju aliran massa:

$$\rho_{udara} (T_{in=49,5^\circ\text{C}}) = 1,0994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\dot{m} = 1,0994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\pi}{4} \times 0,19^2 \text{ m} = 0,1246 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4.2.4 Contoh Perhitungan Massa Uap Air dan *Drying Rate* pada Sisi Udara

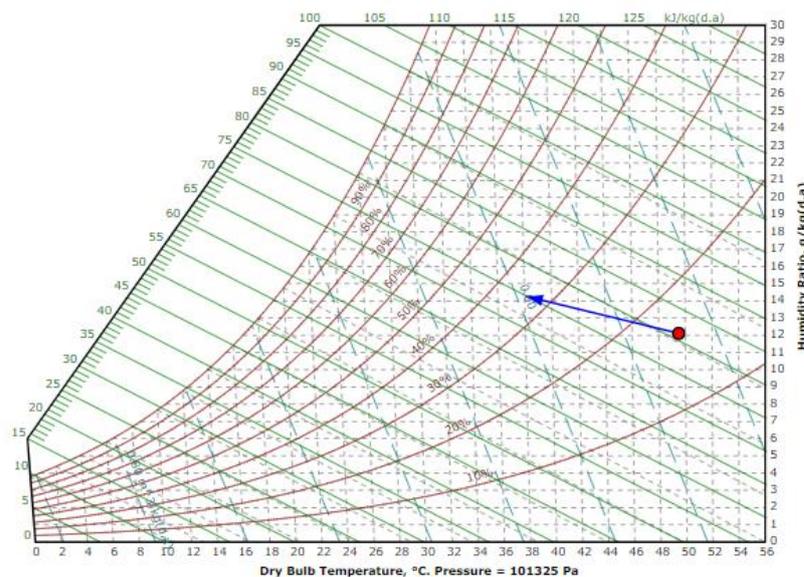
- Massa Uap Air pada *Perforated plate*

Massa *moisture content* dari batubara berpindah menuju udara dalam bentuk uap air yang dapat dinyatakan dalam *humidity ratio*. Pada eksperimen ini digunakan temperature dry bulb dan relative humidity sebagai properties udara untuk menghitung humidity ratio. Berikut ini merupakan contoh perhitungan massa uap air dan *drying rate* sisi udara pada penggunaan jenis *bed perforated plate* diameter 5mm dengan kecepatan 7m/s dan beban pengeringan 200 gr pada menit ke-1.

Udara	T outlet (°C)	Relative Humidity Outlet (%)
Inlet	49,5	16
Outlet	38,07	34

Tabel 4.1 *Properties* udara pengering pada menit ke 1

Kemudian dengan menggunakan *psychrometric chart* kondisi udara pada *inlet* dan *outlet drying chamber* dapat diplotkan sebagai berikut:



Gambar 4.3 Kondisi udara *inlet* dan *outlet* pada menit ke-1 untuk beban pengeringan 200 gr dengan diameter *perforated plate* 5 mm

Titik inlet menunjukkan kondisi udara sebelum memasuki drying chamber sedangkan titik outlet menunjukkan kondisi udara setelah melewati drying chamber, masing-masing pada menit pertama. Dari psychrometric chart tersebut didapatkan nilai properties humidity ratio sebagai berikut:

Posisi Terukur	<i>Humidity Ratio</i> (kg/kg dry air)
Inlet	0,01206
Outlet	0,01421

Tabel 4.2 Nilai *humidity ratio* udara *inlet* dan *outlet* pada menit ke-1

Berdasarkan data humidity ratio pada tabel 4.2 jumlah massa uap air yang diterima oleh udara dapat diperoleh dengan mengalikan selisih humidity ratio pada sisi inlet dan outlet drying

chamber dengan massa udara kering yang mengalir selama 1 menit. Persamaan untuk menghitung humidity ratio adalah sebagai berikut:

$$\Delta\omega_1 = \omega_{out} - \omega_{in}$$

$$\Delta\omega_1 = (0,01421 - 0,01206) \times 1000$$

$$\Delta\omega_1 = 2,15 \text{ gr uap air/kg dry air}$$

Udara yang mengalir ke dalam drying chamber merupakan udara campuran, dimana terdapat uap air di dalamnya. Sehingga perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu untuk mendapatkan massa udara kering yaitu dengan persamaan berikut:

$$m_{dry\ air} = \frac{\dot{m} \times waktu}{\omega_{in}(kg) + 1}$$

$$m_{dry\ air} = \frac{0,1246 \times 60}{0,01206 + 1}$$

$$m_{dry\ air} = 7,327 \text{ kg dry air}$$

maka massa uap air yang diterima udara adalah:

$$m_{\omega_1} = \Delta\omega_1 \times m_{dry\ air}$$

$$m_{\omega_1} = 2,15 \frac{gr}{kg} \text{ dry air} \times 7,327 \text{ kg dry air}$$

$$m_{\omega_1} = 15,75 \text{ gr uap air}$$

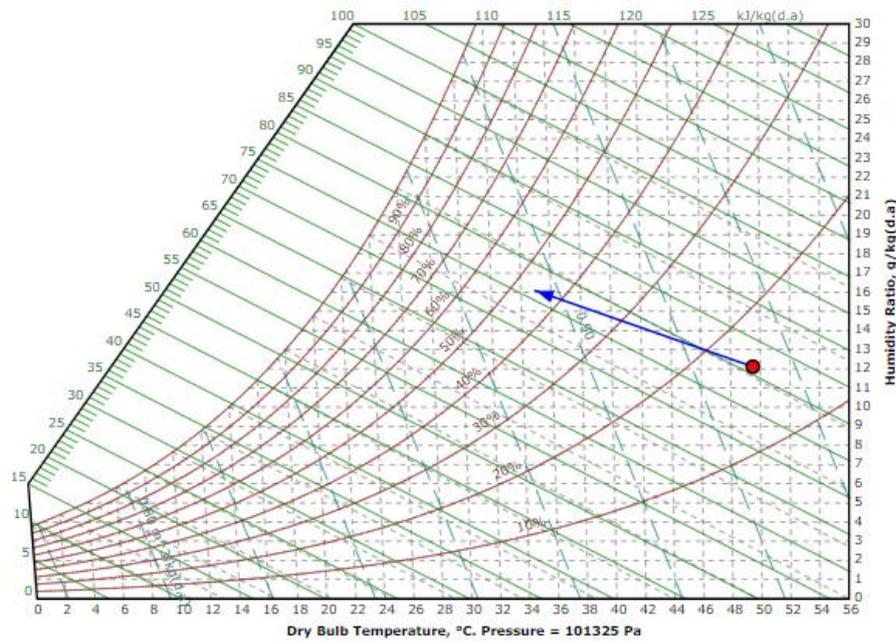
- Massa Uap Air pada *Single row blade*

Massa *moisture content* dari batubara berpindah menuju udara dalam bentuk uap air yang dapat dinyatakan dalam humidity ratio. Pada eksperimen ini digunakan temperature dry bulb dan relative humidity sebagai properties udara untuk menghitung humidity ratio. Berikut ini merupakan contoh perhitungan massa uap air dan *drying rate* sisi udara pada penggunaan jenis *bed single row blade* sudut inklinasi 20° dengan kecepatan 7m/s dan beban pengeringan 200 gr pada menit ke-1.

Udara	T outlet (°C)	Relative Humidity Outlet (%)
Inlet	49,5	16
Outlet	34,90	45,5

Tabel 4.3 *Properties* udara pengering pada menit ke 1

Kemudian dengan menggunakan *psychrometric chart* kondisi udara pada *inlet* dan *outlet drying chamber* dapat diplotkan sebagai berikut:



Gambar 4.4 Kondisi udara *inlet* dan *outlet* pada menit ke-1 untuk beban pengeringan 200 gr dengan *single row blade* sudut inklinasi 20°

Titik inlet menunjukkan kondisi udara sebelum memasuki drying chamber sedangkan titik outlet menunjukkan kondisi udara setelah melewati drying chamber, masing-masing pada menit pertama. Dari psychrometric chart tersebut didapatkan nilai properties humidity ratio sebagai berikut:

Posisi Terukur	Humidity Ratio (kg/kg dry air)
Inlet	0,01206
Outlet	0,01604

Tabel 4.4 Nilai *humidity ratio* udara *inlet* dan *outlet* pada menit ke-1

Berdasarkan data humidity ratio pada tabel 4.4 jumlah massa uap air yang diterima oleh udara dapat diperoleh dengan mengalikan selisih humidity ratio pada sisi inlet dan outlet drying chamber dengan massa udara kering yang mengalir selama 1 menit. Persamaan untuk menghitung humidity ratio adalah sebagai berikut:

$$\Delta\omega_1 = \omega_{out} - \omega_{in}$$

$$\Delta\omega_1 = (0,01604 - 0,01206) \times 1000$$

$$\Delta\omega_1 = 3,98 \text{ gr uap air/kg dry air}$$

Udara yang mengalir ke dalam drying chamber merupakan udara campuran, dimana terdapat uap air di dalamnya. Sehingga perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu untuk mendapatkan massa udara kering yaitu dengan persamaan berikut:

$$m_{dry\ air} = \frac{\dot{m} \times waktu}{\omega_{in}(kg) + 1}$$

$$m_{dry\ air} = \frac{0,1246 \times 60}{0,01637 + 1}$$

$$m_{dry\ air} = 7,355\text{kg dry air}$$

maka massa uap air yang diterima udara adalah:

$$m_{\omega 1} = \Delta\omega_1 \times m_{dry\ air}$$

$$m_{\omega 1} = 3,98 \frac{gr}{kg} \text{ dry air} \times 7,355 \text{ kg dry air}$$

$$m_{\omega 1} = 29,15 \text{ gr uap air}$$

4.2.5 Contoh Perhitungan *Moisture Content* dan *Drying Rate* pada Sisi Batubara

4.2.5.1 *Perforated plate*

- *Moisture Content*

Selama proses pengeringan berlangsung, jumlah moisture content pada batubara akan mengalami penurunan. Untuk mengetahui penurunan nilai moisture content maka data yang dibutuhkan adalah data massa basah dan massa kering batubara pada tiap menitnya.

Menit ke	Massa Basah Batubara (gr)	Massa Keirng Batubara (gr)
0	3,009	1,99
1	0,702	0,515

Tabel 4.5 Data massa batubara hasil eksperimen

Berdasarkan data massa basah dan massa kering batubara pada tabel 4.5, jumlah moisture content yang terkandung pada batubara pada menit ke-0 dan menit ke-1 dapat diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut:

$$MC (\%) = \frac{\text{massa basah} - \text{massa kering}}{\text{massa basah}} \times 100\%$$

$$MC_0 (\%) = \frac{3,009 - 1,99}{3,009} \times 100\% = 34\%$$

$$MC_1 (\%) = \frac{0,702 - 0,515}{0,702} \times 100\% = 27\%$$

- *Drying Rate*

Besarnya nilai drying rate (gr/menit) pada menit pertama dapat diperoleh berdasarkan data pada tabel 4.5 dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Drying rate} = \frac{MC_0 \times \text{massa bb} - MC_1 \times \text{massa bb}}{\text{waktu}}$$

$$\text{Drying rate} = \frac{34\% \times 200 \text{ gr} - 27\% \times 200 \text{ gr}}{1 \text{ menit}} = 14,45 \frac{\text{gr}}{\text{menit}}$$

4.2.5.2 *Single row blade*

Selama proses pengeringan berlangsung, jumlah moisture content pada batubara akan mengalami penurunan. Untuk mengetahui penurunan nilai moisture content maka data yang dibutuhkan adalah data massa basah dan massa kering batubara pada tiap menitnya.

Menit ke	Massa Basah Batubara (gr)	Massa Keirng Batubara (gr)
0	3,009	1,99
1	0,438	0,349

Tabel 4.6 Data massa batubara hasil eksperimen

Berdasarkan data massa basah dan massa kering batubara pada tabel 4.6, jumlah moisture content yang terkandung pada batubara pada menit ke-0 dan menit ke-1 dapat diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut:

$$MC (\%) = \frac{\text{massa basah} - \text{massa kering}}{\text{massa basah}} \times 100\%$$

$$MC_0 (\%) = \frac{3,009 - 1,99}{3,009} \times 100\% = 34\%$$

$$MC_1 (\%) = \frac{0,438 - 0,349}{0,438} \times 100\% = 20\%$$

- **Drying Rate**

Besarnya nilai drying rate (gr/menit) pada menit pertama dapat diperoleh berdasarkan data pada tabel 4.5 dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Drying rate} = \frac{MC_0 \times \text{massa bb} - MC_1 \times \text{massa bb}}{\text{waktu}}$$

$$\text{Drying rate} = \frac{34\% \times 200 \text{ gr} - 20\% \times 200 \text{ gr}}{1 \text{ menit}} = 29,15 \frac{\text{gr}}{\text{menit}}$$

4.2.6 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis

Proses perpindahan panas adalah proses perpindahan panas dari udara pengering ke dalam batubara secara konveksi sedangkan perpindahan massa adalah proses perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering. Pada proses pengeringan terjadi perpindahan panas dan massa yang hampir bersamaan, sehingga dibutuhkan koefisien untuk menentukan besarnya perpindahan panas dan massa antara udara pengering dan batubara. Sebagai contoh berikut yaitu untuk menghitung koefisien perpindahan panas untuk kecepatan 7m/s dan beban pengeringan 200 gr dengan jenis bed *perforated plate* diameter 5 mm digunakan data yang telah terlampir pada lampiran.

- **Menghitung Reynold Number (Re_D)**

$$Re_D = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$Re_D = \frac{1,0994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,00475 \text{ m}}{195,22 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2}} = 1872,505$$

- **Menghitung Nusselt Number (Nu_D)**

$$Nu_D = 2 + 0,6 \times Re_D^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_D = 2 + 0,6 \times 1872,505^{\frac{1}{2}} \cdot 0,703^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_D = 2 + 25,9634 \times 0,89$$

$$Nu_D = 25,085$$

- **Nilai Koefisien Perpindahan Panas (h)**

$$h = Nu_D \times \frac{k}{D}$$

$$h = 25,085 \times \frac{0,0279}{0,00475}$$

$$h = 145,228947 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.2.7 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Aktual

Pada perhitungan nilai koefisien perpindahan massa teoritis dan aktual terdapat perbedaan nilai pada hasil aktual dan teoritis. Perbedaan ini akan memengaruhi nilai koefisien perpindahan panas aktual yang terjadi selama proses pengeringan batubara. Berikut ini merupakan perhitungan nilai koefisien perpindahan panas aktual pada sisi batubara untuk kecepatan 7m/s dan beban pengeringan 200 gr dengan jenis bed *perforated plate* diameter 5 mm digunakan data yang telah terlampir pada lampiran.

$$Q = h \times A \times (T_\infty - T_s) = n_A \times h_{fg}$$

$$h \times A_s \times (T_\infty - T_s) = h_m \times A_s \times (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \cdot h_{fg}$$

$$h = \frac{h_m \times h_{fg} \times (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})}{(T_\infty - T_s)}$$

$$T_\infty = 322,5 \text{ K}$$

$$T_s = 311,22 \text{ K}$$

$$\rho_{A,s} = 1,128 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{A,\infty} = 1,09 \text{ kg/m}^3$$

$$h_{m \text{ aktual}} = 0,039 \text{ m/s}$$

$$h_{fg(322,5K)} = h_g - h_f = 2590,1 - 206,62 = \mathbf{2383,49 \times 10^3 \text{ J/kg}}$$

$$h = \frac{0,039 \times 2383,49 \times 10^3 \times (1,128 - 1,09)}{(322,5 - 311,22)} = \mathbf{311,64 \text{ W/m}^2 \text{ K}}$$

4.2.8 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis

Selama proses pengeringan batubara tidak hanya terjadi perpindahan panas, melainkan ada proses perpindahan massa juga. Perpindahan massa adalah proses perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering. Ditinjau dari perhitungan perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan batubara berlangsung, maka nilai koefisien antara perpindahan panas dan massa dari pengeringan saling berkaitan. Hal ini dapat dibuktikan dengan rumus perhitungan sebagai berikut untuk menghitung nilai koefisien perpindahan massa kecepatan 7m/s dan beban pengeringan 200 gr dengan jenis bed *perforated plate* diameter 5 mm digunakan data yang telah terlampir pada lampiran.

$$Q = h \cdot A_S \cdot (T_\infty - T_s) = n_A \cdot h_{fg}$$

$$h \cdot A_S \cdot (T_\infty - T_s) = h_m \cdot A_S (\rho_{As} - \rho_{A\infty}) \cdot h_{fg}$$

$$\frac{h}{h_m} = \frac{h_{fg}(\rho_{As} - \rho_{A\infty})}{(T_s - T_\infty)}$$

$$h_m = \frac{h (T_\infty - T_s)}{h_{fg}(\rho_{As} - \rho_{A\infty})}$$

Dengan nilai

$$h = 145,228947 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\begin{aligned} h_{fg(T=322,5 K)} &= h_g - h_f = (2590,1 - 206,62) \frac{kJ}{kg} \\ &= 2383,48 \frac{kJ}{kg} = 2383,48 \times 10^3 \frac{J}{g} \end{aligned}$$

Data pada menit ke-1

$$T_s = 311,22 \text{ }^\circ K$$

$$T_\infty = 322,5 \text{ }^\circ K$$

$$\rho_{As} = 1,124 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{A\infty} = 1,0869 \text{ kg/m}^3$$

$$h_m = \frac{145,228947 \frac{W}{m^2 \cdot K} (322,5 - 311,22)^\circ K}{2383,48 \times 10^3 \frac{J}{g} (1,124 - 1,0869) \frac{kg}{m^3}} = 0,01832 \frac{m}{s}$$

4.2.9 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Aktual

Dalam proses perpindahan panas yang terjadi dimana perpindahan panas berpindah menuju dalam batubara dari udara pengering, proses perpindahan ini terjadi secara konveksi sedangkan untuk perpindahan massa yang terjadi dimana perpindahan massa berpindah menuju udara pengering dari uap air yang terkandung dalam batubara. Di dalam masing-masing proses tersebut terdapat koefisien yang digunakan untuk menentukan besarnya massa ataupun panas

yang mengalami perpindahan antara batubara dan udara pengering. Untuk proses pengeringan yang sedang berlangsung perpindahan massa dan panas ini terjadi dalam waktu hampir bersamaan. Untuk menentukan laju perpindahan massa dalam percobaan dengan ketiga variasi beban maka digunakan data pada variasi beban pengeringan 200 gram dan kecepatan udara pengering 7 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm.

- **Menghitung nilai laju perpindahan massa pada menit pertama**

Beban pengering = 200 gr

$$\Delta\omega = 2,15 \text{ g/kg}$$

$$\dot{m} = 0,12 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} n_A &= \dot{m}_{udara} \times \Delta\omega \\ n_A &= 0,12 \times 2,15 \\ n_A &= 0,258 \frac{\text{gr}}{\text{s}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ gr}} \\ n_A &= 0,258 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

- **Menghitung volume batubara**

Pada eksperimen ini asumsi digunakan batubara dengan bentuk granular berupa bola dengan diameter batubara sebsar 4,75 mm.

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$$

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot 0,002375^3$$

$$V = 5,608 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

- **Menghitung massa batubara perbutir**

$$\begin{aligned} m &= \rho_{coal} \cdot V_{coal} \\ m &= 1450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5,608 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \\ m &= 0,81316 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \\ m &= 0,081316 \text{ gram} \end{aligned}$$

- **Menghitung jumlah sampel batubara berdasarkan berat batubaranya**

$$\begin{aligned} n &= \frac{m_{sample}}{m_{batubara}} \\ n &= \frac{200 \text{ gram}}{0,081 \text{ gram}} = 2469 \text{ biji} \end{aligned}$$

- **Menghitung luas permukaan batubara (As)**

Berat total batubara = 200 gr

Berat 1 batubara = 0,0813 gr

$$A_{sur} = \text{jumlah berat bb} \times A_{sur(1 \text{ batubara})}$$

$$A_{sur} = \frac{200 \text{ gr}}{0,0813 \text{ gr}} \times 4\pi(0,002375)^2 \text{ m}^2$$

$$A_{sur} = 0,1749 \text{ m}^2$$

- Menghitung nilai koefisien perpindahan massa

Data pada menit ke-1

$$T_s = 311,22 \text{ } ^\circ K$$

$$T_\infty = 322,5 \text{ } ^\circ K$$

$$\rho_{As} = 1,124 \text{ } kg/m^3$$

$$\rho_{A\infty} = 1,0869 \text{ } kg/m^3$$

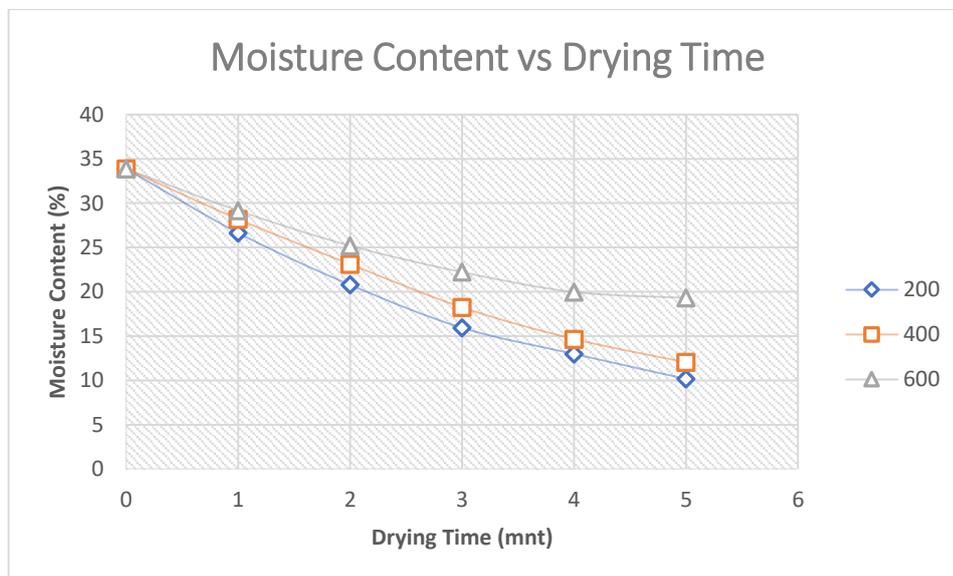
$$h'_m = \frac{n_A}{A_{sur}(\rho_{As} - \rho_{A\infty})}$$

$$h'_m = \frac{5,472 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}}{0,1749m^2 \cdot (1,124 - 1,0869) \frac{kg}{m^3}}$$

$$h'_m = 0,03933 \frac{m}{s}$$

4.3 Analisa Hasil Eksperimen dari Sisi Batubara

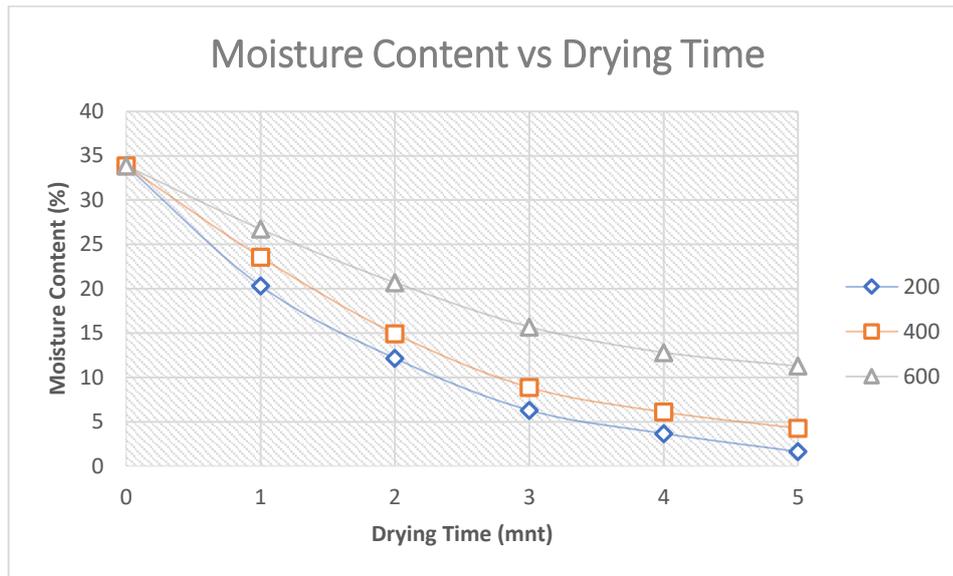
4.3.1 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap *Moisture Content* Fungsi Waktu



Gambar 4.5 Pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* fungsi waktu pada *perforated plate*

Gambar 4.5 menunjukkan grafik pengaruh beban pengeringan terhadap kandungan air pada fungsi waktu pengeringan. Nilai *moisture content* didapatkan dengan pembagian antara selisih massa basah batubara dengan massa kering batubara. Jenis bed pengeringan yang digunakan adalah *perforated plate* diameter 5 mm dengan kecepatan udara pengeringan sebesar 7 m/s. Pada menit ke-0 dengan beban pengeringan 200 gram terjadi penurunan nilai kandungan air dari 34% menjadi 27%, pada beban pengeringan 400 gram terjadi penurunan nilai

kandungan air dari 34% menjadi 28%, pada beban pengeringan 600 gram terjadi penurunan nilai kandungan air dari 34% menjadi 29%. Pada grafik 4.5 menunjukkan trend penurunan nilai *moisture content* yang signifikan terhadap waktu pengeringan, untuk beban pengeringan 200 gram mengalami penurunan nilai kandungan air paling cepat, kemudian diikuti dengan beban pengeringan 400 dan 600 gram. Pada rentang waktu lima menit terjadi penurunan *moisture content* yang cukup besar pada ketiga beban pengeringan. Grafik diatas juga menunjukkan bahwa penggunaan *perforated plate* diameter 5 mm dengan kecepatan udara pengering 7 m/s dan beban pengeringan 200 gram memiliki penurunan *moisture content* yang paling banyak.



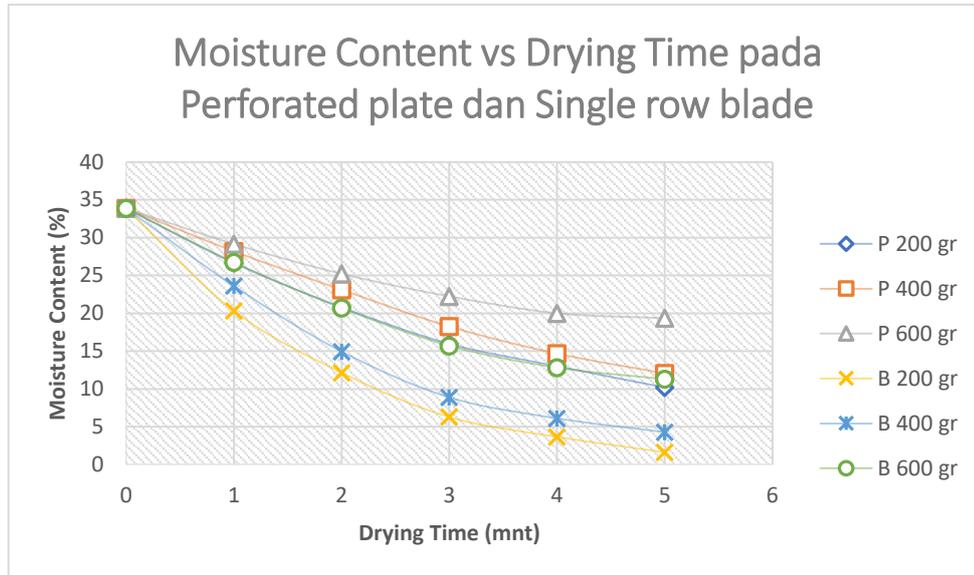
Gambar 4.6 Pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* fungsi waktu pada *single row blade*

Gambar 4.6 menunjukkan grafik pengaruh beban pengeringan terhadap kandungan air pada fungsi waktu pengeringan. Nilai *moisture content* didapatkan dengan pembagian antara selisih massa basah batubara dengan massa kering batubara. Jenis bed pengeringan yang digunakan adalah *single row blade* sudut inklinasi 20° dengan kecepatan udara pengering sebesar 7 m/s. Pada menit ke-0 dengan beban pengeringan 200 gram terjadi penurunan nilai kandungan air dari 34% menjadi 20%, pada beban pengeringan 400 gram terjadi penurunan nilai kandungan air dari 34% menjadi 24%, pada beban pengeringan 600 gram terjadi penurunan nilai kandungan air dari 34% menjadi 27%. Pada grafik 4.6 menunjukkan trend penurunan nilai *moisture content* yang signifikan terhadap waktu pengeringan, untuk beban pengeringan 200 gram mengalami penurunan nilai kandungan air paling cepat, kemudian diikuti dengan beban pengeringan 400 dan 600 gram. Pada rentang waktu lima menit terjadi penurunan *moisture content* yang cukup besar pada ketiga beban pengeringan. Grafik diatas juga menunjukkan bahwa penggunaan *perforated plate* diameter 5 mm dengan kecepatan udara pengering 7 m/s dan beban pengeringan 200 gram memiliki penurunan *moisture content* yang paling banyak.

Beban pengeringan mempengaruhi laju drying rate, hal ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada

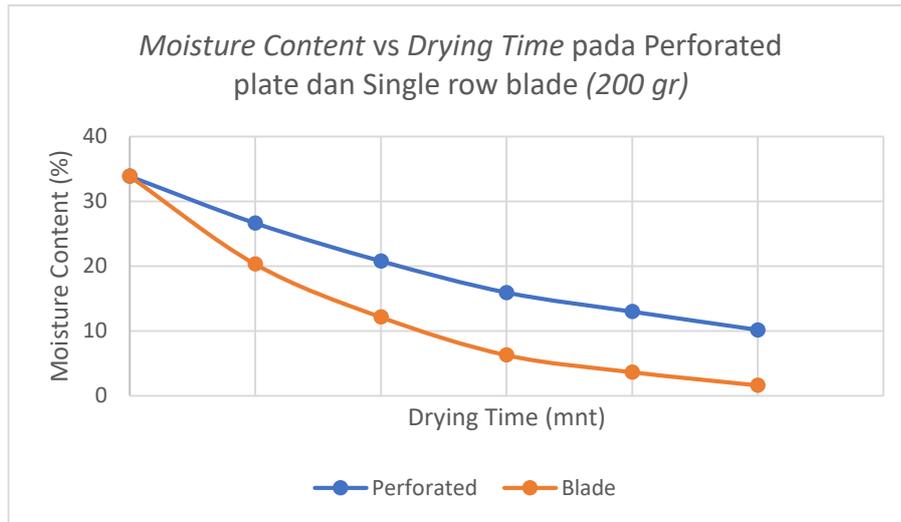
permukaan batubara. Daya serap menurun maka laju pengeringan akan menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah beban yang lebih kecil. Lalu pengaruh dari hubungan antara variasi beban dengan nilai koefisien perpindahan massa, dimana semakin banyak jumlah beban pengeringan maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan massanya.

4.3.2 Pengaruh Beban Pengeringan terhadap *Moisture Content* Fungsi Waktu pada *Perforated plate* vs *Single row blade*



Gambar 4.7 Grafik perbandingan pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* terhadap fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade*

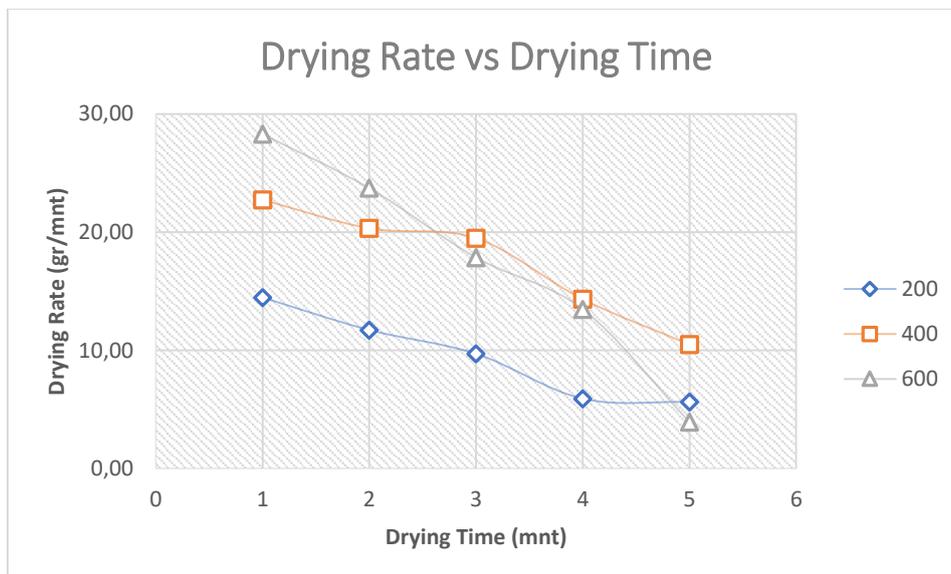
Grafik 4.7 menunjukkan bahwa urutan penurunan nilai *moisture content* batubara pada menit pertama pengeringan dari yang paling sedikit hingga paling banyak adalah *perforated plate* dengan diameter 5mm beban pengeringan 600 gram dan 400 gram, *single row blade* dengan sudut 20° beban pengeringan 600 gram *perforated plate* dengan diameter 5mm beban pengeringan 200 gram, *single row blade* dengan sudut 20° beban pengeringan 200 dan 400 gram. Pada menit terakhir pengeringan yaitu menit kelima, terlihat bahwa nilai *moisture content* untuk 6 variasi eksperimen yang dilakukan tidak sama. Hal ini berarti dalam waktu 5 menit, proses pengeringan batubara dengan 6 variasi yang berbeda belum dapat mencapai kadar air yang sama.



Gambar 4.8 Grafik perbandingan pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* terhadap fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade* beban pengeringan 200 gr

Penurunan nilai *moisture content* batubara terbanyak ada pada penggunaan *bed* jenis *single row blade* dengan sudut 20° dengan beban pengeringan sebesar 200 gram. Hal ini dikarenakan massa air yang terdapat pada batubara lebih sedikit dan juga pada *bed* pengeringan jenis ini aliran kecepatan udara pengering membentuk *cyclone* sehingga batubara akan lebih lama terkena udara pengeringan dengan suhu yang tinggi. Berdasarkan literatur yang telah ada batas inheren pada batubara adalah sebesar 15%, jika pengeringan dilakukan lebih dari batas inheren *moisture content* yang telah ditentukan maka proses pengeringan tersebut tidak lagi efektif karena batubara tersebut sudah tidak dapat melepaskan air lagi.

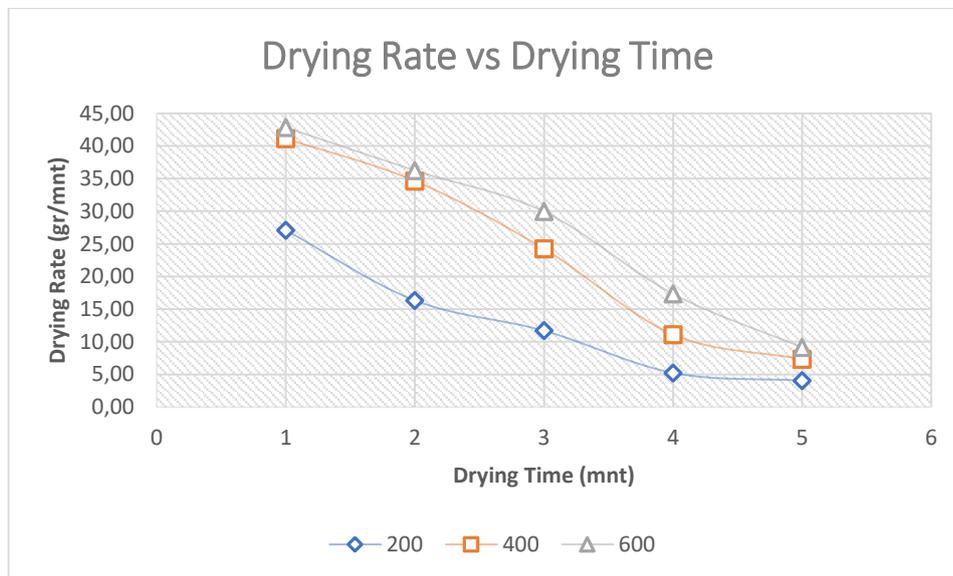
4.3.3 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap *Drying Rate* Fungsi Waktu



Gambar 4.9 Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi waktu pada *perforated plate*

Drying rate merupakan besarnya massa air dari batubara yang berpindah ke udara pengering dalam satuan waktu tertentu. Dalam eksperimen ini, *drying rate* merupakan massa air batubara yang berpindah ke udara pengering selama satu menit pengeringan. Pada grafik di

atas, titik 1 merupakan drying rate batubara pada menit pertama pengeringan menggunakan *perforated plate* dengan diameter 5mm dan beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr berturut-turut yaitu sebesar 14,45 gr/menit, 22,73 gr/menit, 28,30 gr/menit. Untuk selanjutnya nilai dari drying rate akan mengalami penurunan hingga menit kelima, nilai drying rate pada menit kelima berturut-turut sebesar 5,62 gr/menit, 10,49 gr/menit dan 3,91 gr/menit.

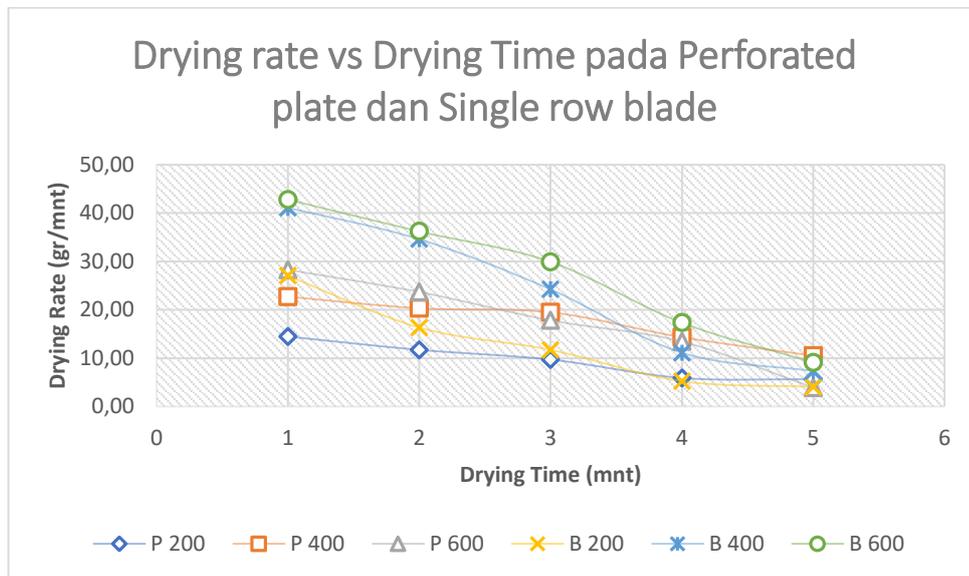


Gambar 4.10 Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi waktu pada *single row blade*

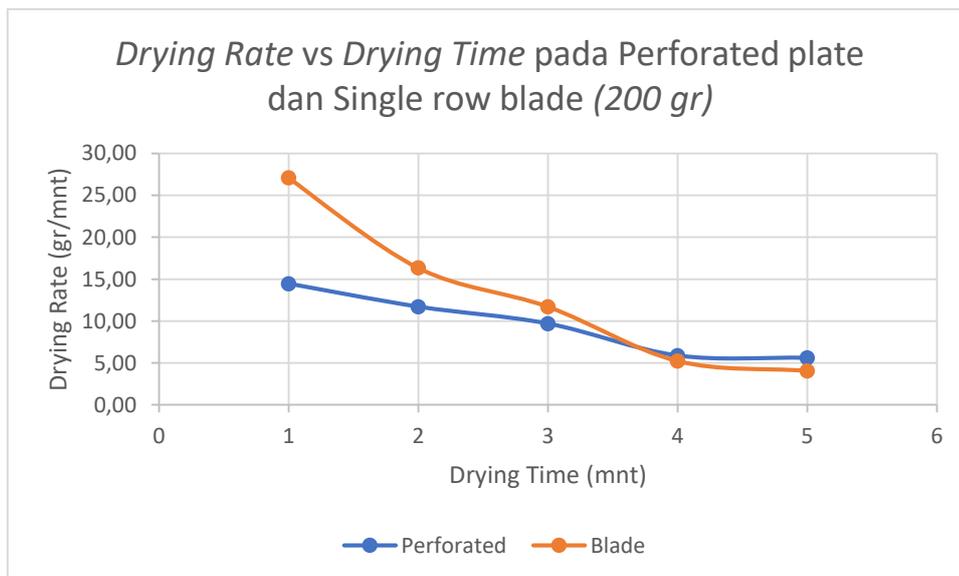
Pada grafik di atas, titik 1 merupakan drying rate batubara pada menit pertama pengeringan menggunakan *perforated plate* dengan diameter 5mm dan beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr berturut-turut yaitu sebesar 27,09 gr/menit, 41,11 gr/menit, 42,82 gr/menit. Untuk selanjutnya nilai dari drying rate akan mengalami penurunan hingga menit kelima, nilai drying rate pada menit kelima berturut-turut sebesar 4,07 gr/menit, 7,32 gr/menit dan 9,14 gr/menit.

Menurunnya nilai drying rate ini menunjukkan besarnya nilai moisture content yang berkurang tiap satuan waktu, untuk besar nilai penurunan drying rate dipengaruhi oleh beban pengeringan yang digunakan. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada permukaan batubara. Daya serap menurun maka laju pengeringan akan menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah beban yang lebih kecil. Lalu pengaruh dari hubungan antara variasi beban dengan nilai koefisien perpindahan massa, dimana semakin banyak jumlah beban pengeringan maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan massanya. Koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi laju perpindahan massa.

4.3.4 Pengaruh Beban Pengeringan terhadap *Drying Rate* Fungsi Waktu pada *Perforated plate* vs *Single row blade*



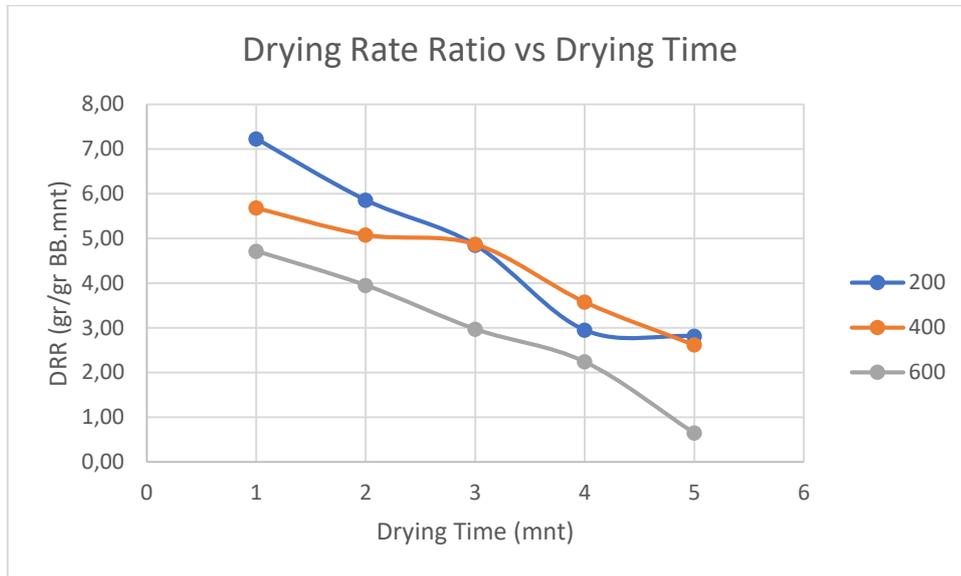
Gambar 4.11 Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade*



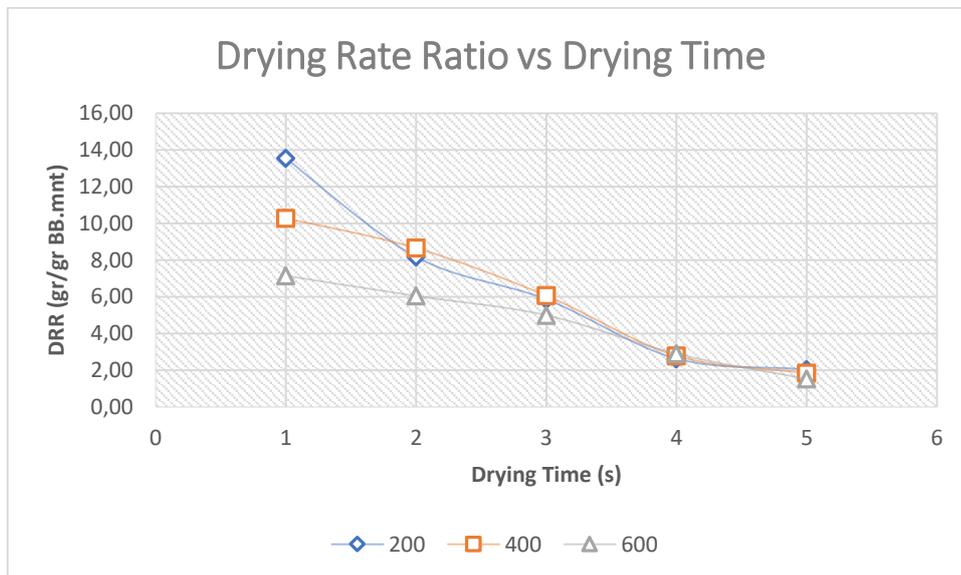
Gambar 4.12 Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade* beban pengeringan 200 gr

Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa beban pengeringan 200 gr memiliki nilai *drying rate* yang kecil, sedangkan untuk jenis bed pengeringan *single row blade* memiliki penurunan nilai *drying rate* yang lebih besar dibandingkan dengan *perforated plate*, sehingga variasi 200 gram dan bed jenis *single row blade* merupakan variasi paling optimal.

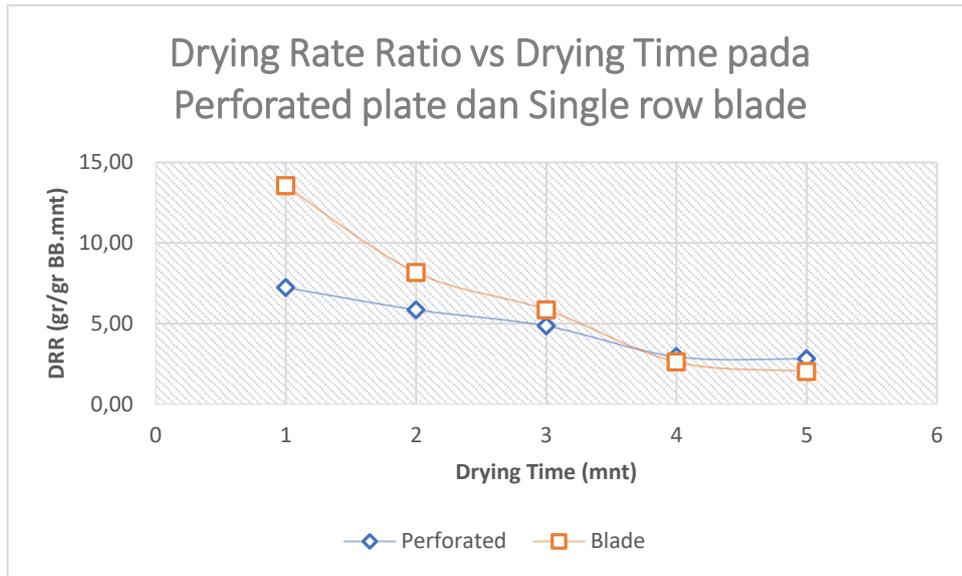
4.3.5 Analisa Pengaruh Beban Pengerian Terhadap Ratio Drying Rate (Intensity Drying Rate) Fungsi Waktu



Gambar 4.13 Pengaruh beban pengerian terhadap *drying rate ratio* fungsi waktu pada *perforated plate*



Gambar 4.14 Pengaruh beban pengerian terhadap *drying rate* fungsi waktu pada *single row blade*

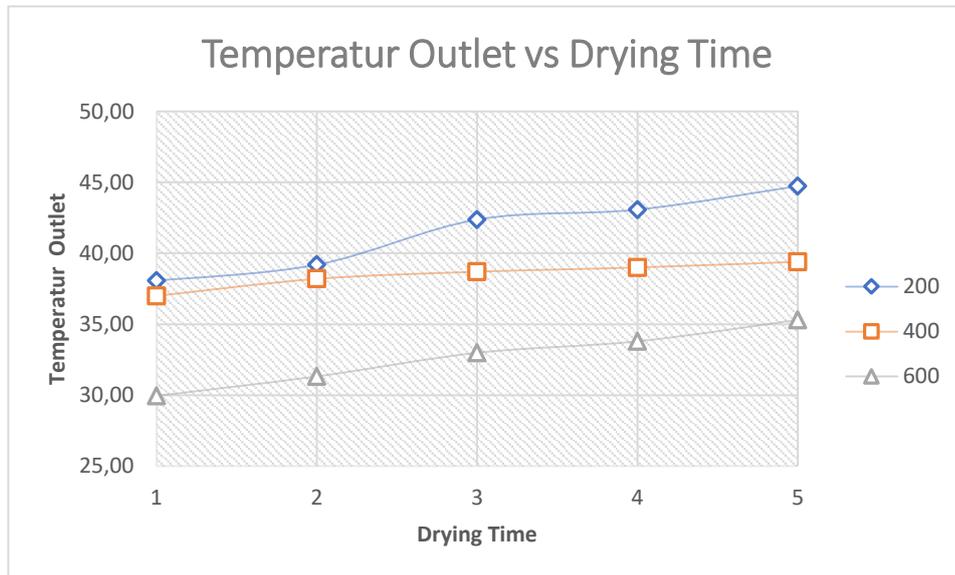


Gambar 4.15 Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate ratio* fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade* beban pengeringan 200 gr

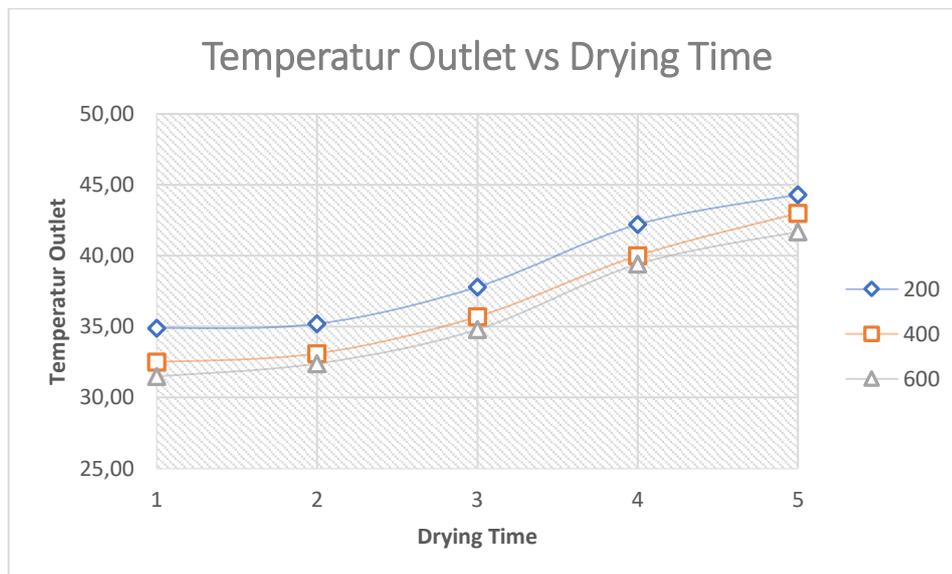
Grafik diatas merupakan ratio drying rate, ratio drying rate ini digunakan untuk mengetahui efektifitas dari setiap variasi beban pengeringan batubara. Pada bed pengeringan jenis *perforated plate* dengan beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr memiliki nilai selisih penurunan drying rate dari menit pertama ke menit kedua sebesar 1,37, 0,60 dan 0,76 gr/gr BB.mnt. Kemudian untuk bed jenis pengeringan *single row blade* dengan beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr memiliki nilai selisih penurunan drying rate dari menit pertama ke menit kedua sebesar 5,38, 1,62 dan 1,10 gr/gr BB.mnt. Terlihat bahwa terjadi penurunan secara signifikan pada variasi 200 gram dengan jenis bed pengeringan *single row blade*.

4.4 Analisa Hasil dan Pembahasan dari Sisi Udara

4.4.1 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Temperatur Udara Keluar *Drying Chamber* Fungsi Waktu



Gambar 4.13 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar *drying chamber* fungsi waktu pada *perforated plate*



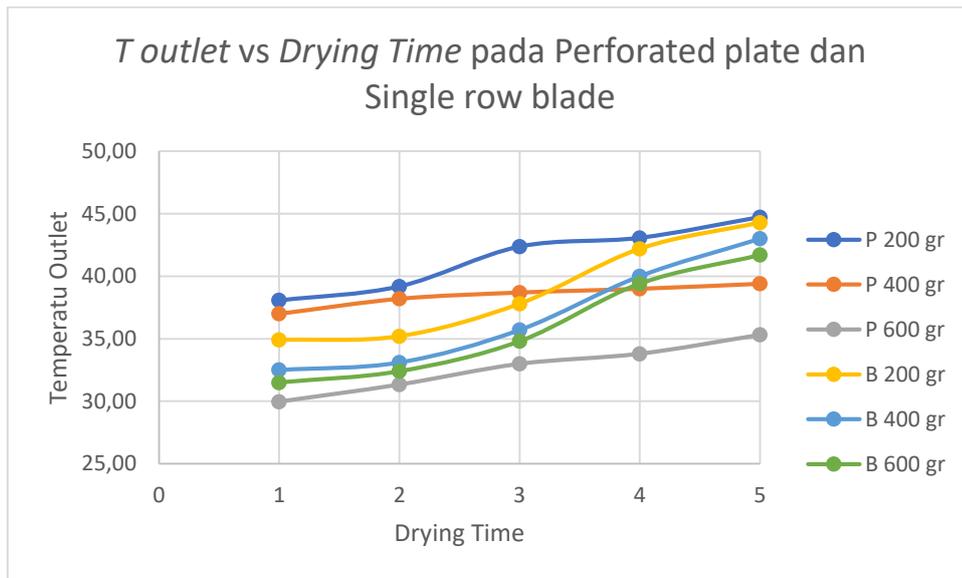
Gambar 4.14 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar *drying chamber* fungsi waktu pada *single row blade* beban pengeringan 200 gram

Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan 3 variasi beban pengeringan sebesar 200 gr, 400 gr dan 600 gr dengan dua jenis bed pengeringan yaitu *perforated plate* dengan diameter 5mm dan *single row blade* dengan sudut inklinasi 20°. Dari grafik diatas dapat terlihat bahwa trend untuk setiap variasi beban pengeringan menunjukkan kenaikan temperatur. Temperatur keluar udara pengering pada menit pertama tercatat sebesar 38,07°C, 37,0°C, 29,96°C masing-masing untuk beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr pada *perforated plate* dan untuk bed pengeringan *single row blade*, temperatur keluar udara pengering pada

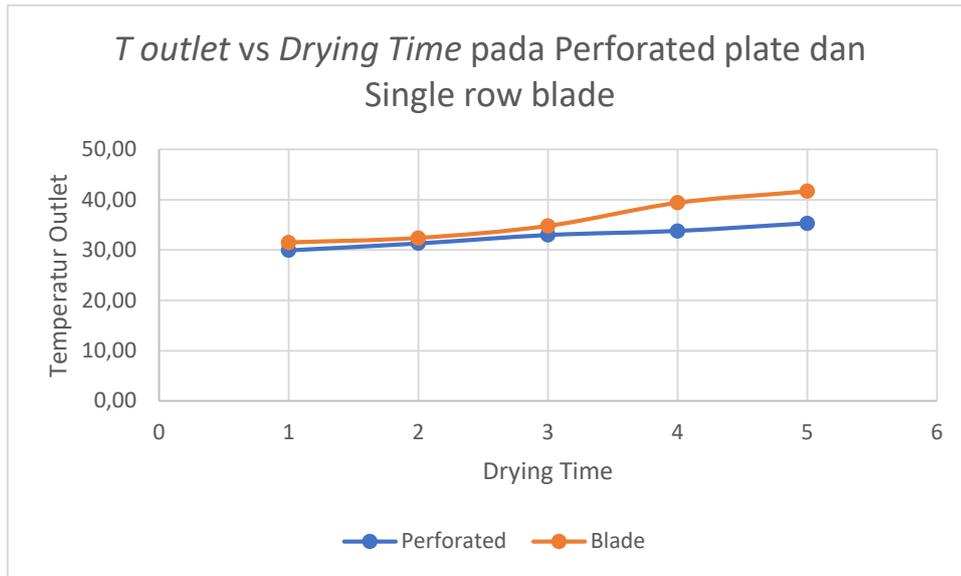
menit pertama tercatat sebesar 34,90°C, 32,5°C, 31,5°C masing-masing untuk beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr.

Pada grafik temperatur dalam fungsi waktu dapat diketahui bahwa untuk beban pengeringan 200 gram memiliki nilai temperatur keluaran drying chamber paling tinggi diikuti dengan beban pengeringan 400 gram dan 600 gram. Tinggi rendahnya nilai temperatur keluaran dari drying chamber dipengaruhi oleh kandungan massa air yang terdapat pada batubara. Semakin besar jumlah beban pengeringan maka dibutuhkan panas yang besar dikarenakan kandungan massa air pada batubara juga lebih besar. Kenaikan temperatur yang terjadi dikarenakan adanya transfer panas dari udara pengering dengan permukaan batubara, dari hubungan antara nilai kalor dan selisih temperatur permukaan batubara dengan temperatur udara pengering berbanding lurus. Temperatur udara pengering semakin mengalami kenaikan hingga mendekati temperatur inlet pada menit ke-5 karena kandungan air yang dapat dikeringkan dari batubara sudah tidak sebanyak pada kondisi menit pertama. Dari grafik penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* d 5 mm maupun grafik penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20°.

4.4.2 Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Outlet Temperature Drying Chamber Fungsi Waktu pada *Perforated plate* vs *Single row blade*



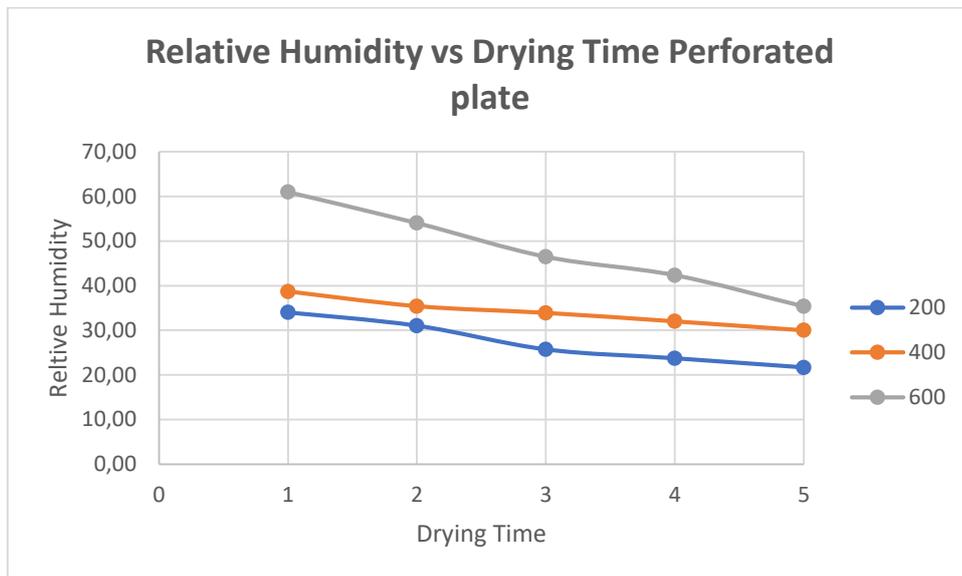
Gambar 4.15 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar *drying chamber* fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade*



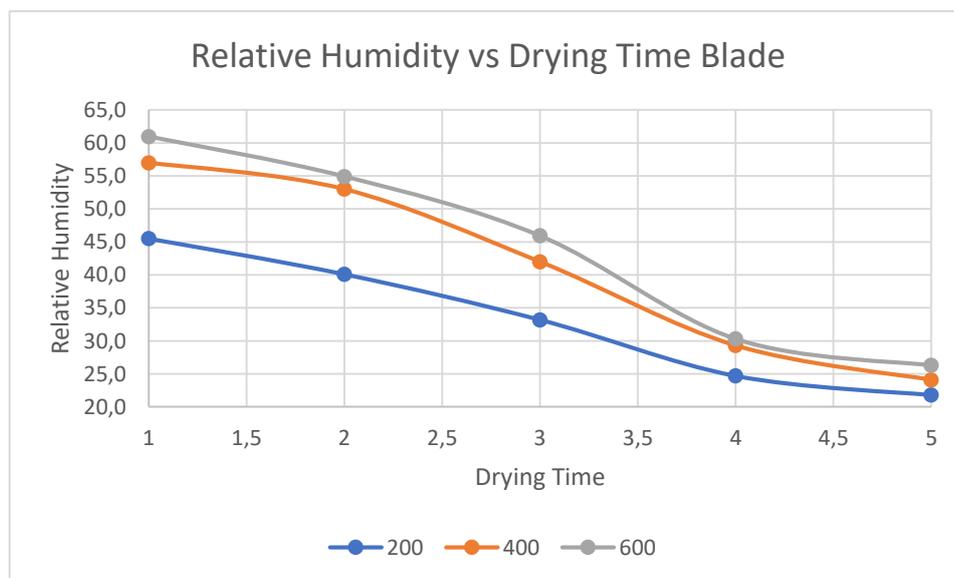
Gambar 4.16 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar *drying chamber* fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade* beban pengeringan 200 gram

Dari grafik, terlihat bahwa nilai temperature udara pengering yang keluar dari *chamber* saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm lebih rendah dari nilai temperature udara pengering yang keluar dari *chamber* saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20°. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan jenis *bed* pengeringan *single row blade* dengan sudut 20° lebih optimal untuk mengeringkan batubara daripada menggunakan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm. Fenomena ini terjadi karena aliran udara pengering saat melewati *single row blade* dengan sudut 20° menjadi memutar (lintasan aliran udara semakin panjang) dan lebih turbulen dikarenakan adanya kenaikan sudut sehingga bilangan Reynoldnya akan bertambah. Pertambahan bilangan Reynold akan menyebabkan kecepatan udara pengering saat melewati *single row blade* dengan sudut 20° akan lebih besar daripada kecepatan udara yang melewati *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm.

4.4.3 Pengaruh Beban Pengeringan terhadap *Relative Humidity Drying Chamber* Fungsi Waktu



Gambar 4.17 Pengaruh beban pengeringan terhadap *relative humidity outlet* fungsi waktu pada *perforated plate*



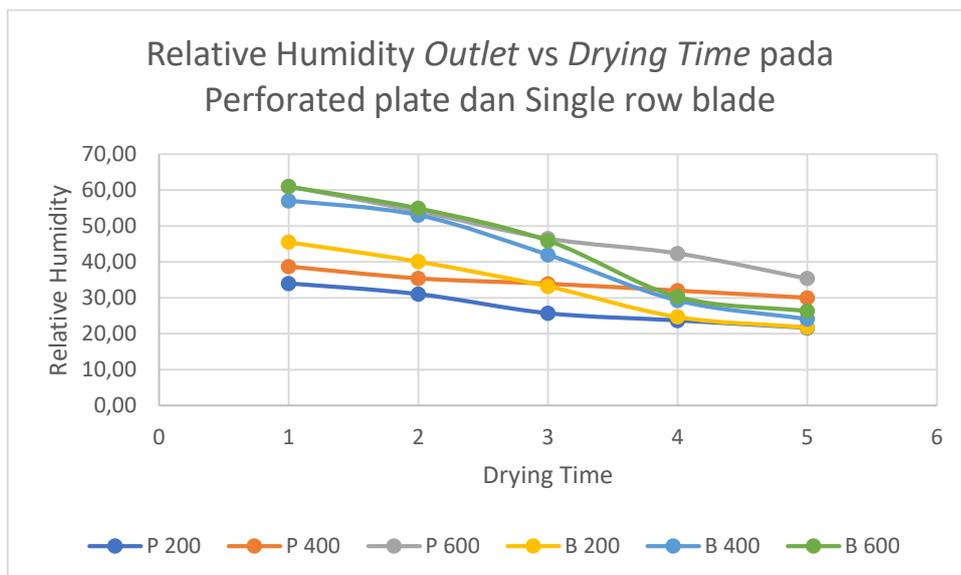
Gambar 4.18 Pengaruh beban pengeringan terhadap *relative humidity outlet* fungsi waktu pada *single row blade*

Pada grafik diatas dapat dilihat grafik pengaruh beban pengeringan terhadap relative humidity sebagai fungsi waktu. Jumlah uap air yang terdapat didalam campuran antara air dengan udara pada fase gas disebut relative humidity. Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan 3 variasi beban pengeringan sebesar 200 gr, 400 gr dan 600 gr dengan dua jenis bed pengeringan yaitu *perforated plate* dengan diameter 5mm dan *single row blade* dengan sudut inklinasi 20°. *Relative humidity* keluar udara pengering pada menit pertama tercatat sebesar 34%, 38,7% dan 61% masing-masing untuk beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr pada *perforated plate* dan untuk bed pengeringan *single row blade*, *relative humidity* keluar

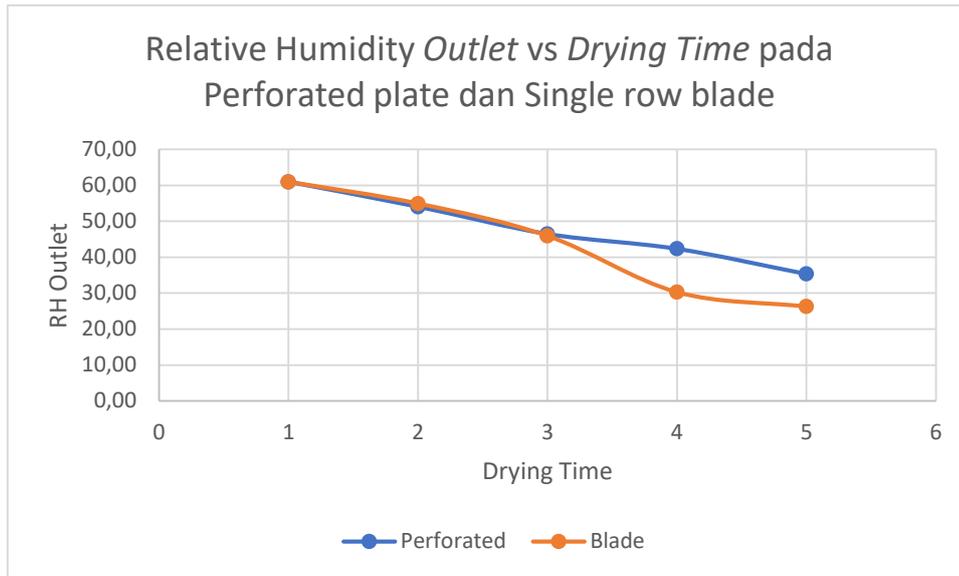
pada menit pertama tercatat sebesar masing-masing 45%, 57% dan 60,96% untuk beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr. Kemudian *relative humidity* udara pengering semakin mengalami penurunan hingga mendekati *relative humidity* inlet pada menit ke-5.

Terjadinya penurunan yang terjadi pada *relative humidity* untuk setiap variasi beban pengeringan menandakan adanya perubahan massa uap air yang ada di udara pengering. Perubahan nilai *relative humidity* disebabkan oleh adanya *moisture content* yang berpindah ke udara pengering dari batubara selama proses pengeringan. Untuk beban pengeringan yang besar memiliki nilai *relative humidity* yang besar, dan juga sebaliknya. Hal ini dikarenakan jumlah massa air yang terdapat pada batubara semakin banyak, berbeda bila dibandingkan dengan jumlah beban pengeringan 400 gram dan 200 gram. Untuk beban 400 gram dan 200 gram memiliki nilai *relative humidity* lebih kecil dikarenakan ketika udara melewati permukaan batubara jumlah massa uap air pada kedua beban tersebut lebih sedikit. Sehingga massa uap air yang terserap oleh udara juga menjadi lebih sedikit. Dari grafik ini dapat diketahui bahwa laju perpindahan massa paling cepat terjadi pada menit-menit awal, laju perpindahan massa dari batubara menuju udara pengering dipengaruhi oleh luas permukaan batubara, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dari grafik ini dapat diketahui bahwa laju perpindahan massa paling cepat terjadi pada menit-menit awal, laju perpindahan massa dari batubara menuju udara pengering dipengaruhi oleh luas permukaan batubara, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dari grafik penggunaan bed pengeringan jenis *perforated plate* 5 mm, terlihat bahwa nilai *relative humidity* udara keluar chamber milik beban pengeringan 200 gr paling rendah dibandingkan beban pengeringan 400 gr dan 600 gr begitu pula saat penggunaan *single row blade* dengan sudut 20°. Sehingga dapat disimpulkan bahwa beban pengeringan 200 gr dianggap lebih optimal untuk mengeringkan batubara.

4.4.4 Pengaruh Beban Pengeringan terhadap *Relative Humidity Outlet Drying Chamber* Fungsi Waktu pada *Perforated plate* vs *Single row blade*



Gambar 4.19 Pengaruh beban pengeringan terhadap *relative humidity outlet* fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade*



Gambar 4.20 Pengaruh beban pengeringan terhadap *relative humidity outlet* fungsi waktu pada *perforated plate* dan *single row blade*

Dari grafik, terlihat bahwa nilai *relative humidity* udara pengering yang keluar dari *chamber* saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada beban pengeringan 200 gr lebih tinggi dari nilai *relative humidity* udara pengering yang keluar dari *chamber* saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm pada beban pengeringan 200 gr sehingga nilai ΔT dan ΔRH nya lebih tinggi. Ketika nilai ΔT dan ΔRH nya semakin tinggi, laju perpindahan panas dan massa yang terjadi juga akan semakin besar. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan jenis *bed* pengeringan *single row blade* dengan sudut 20° pada beban pengeringan 200 gr lebih optimal untuk mengeringkan batubara daripada menggunakan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm pada beban pengeringan yang sama.

4.4.5 Analisa Udara Pengering pada Diagram Psikrometrik

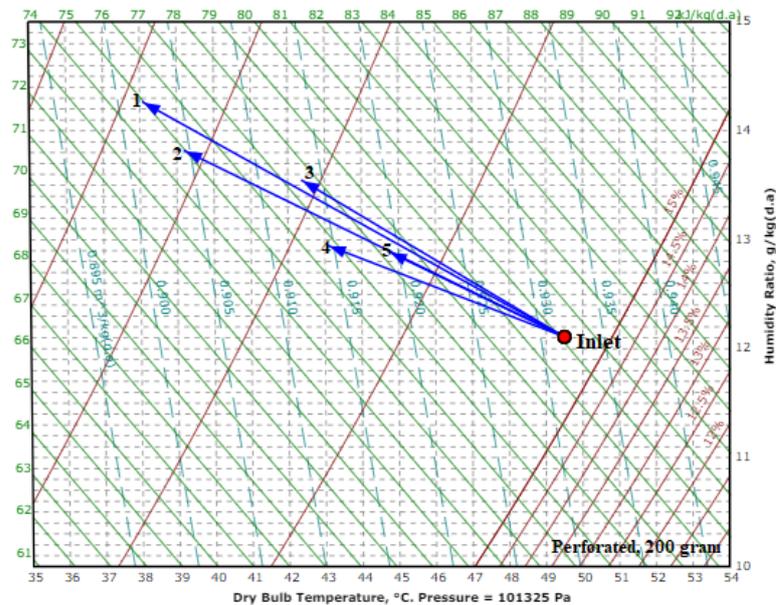
Dalam proses pengeringan terdapat 2 proses utama yaitu proses perpindahan panas dan perpindahan massa. Saat proses pengeringan berlangsung moisture content dalam batubara akan terus berkurang, hal ini juga menyebabkan massa dari batubara berkurang. Agar proses perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering dapat berlangsung, ada beberapa kriteria diantaranya yaitu :

1. Saat suhu udara pengering panas maka akan mempunyai nilai *relative humidity* yang rendah, hal ini akan lebih mudah untuk udara pengering menyerap uap air dari batubara.
2. Ketika udara pada bagian permukaan batubara lebih panas dibandingkan bagian dalam batubara maka akan terjadi perbedaan tekanan sampai dengan uap air akan bergerak menuju bagian permukaan batubara.
3. Adanya perbedaan temperatur antara udara pengering dan batubara, udara pengering yang digunakan mempunyai temperatur lebih tinggi dari batubara agar proses perpindahan panas dapat terjadi.

Hubungan antara temperature dry bulb dan *relative humidity* udara pengering dapat diketahui melalui karakteristik campuran uap air pada udara. Untuk analisa yang ditinjau dari

sisi udara digunakan diagram psikometrik, data yang didapatkan akan dianalisa dengan diagram psikometrik yaitu nilai relative humidity sisi keluaran (RHout) dan temperature sisi keluaran (Tout). Nantinya akan diplot untuk mendapatkan humidity ratio (ω), nilai nilai humidity ratio (ω) ini akan digunakan untuk menentukan besarnya uap air yang berpindah menuju udara pengering.

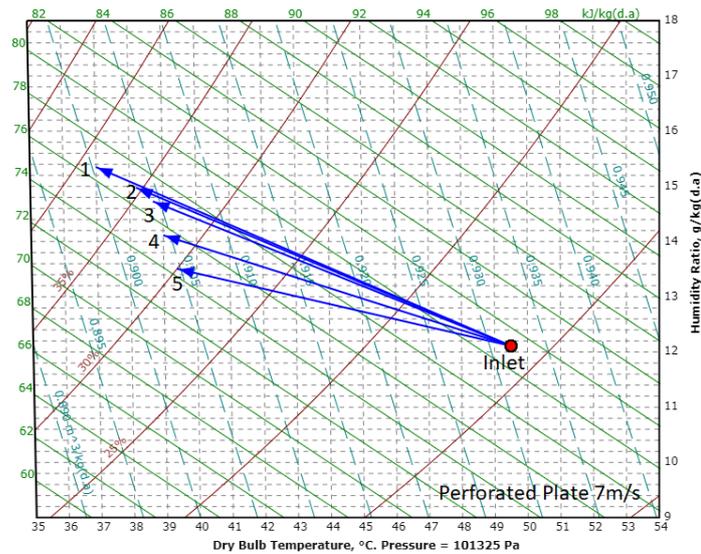
4.4.5.1 Grafik Psikrometrik Udara Pengering pada *Perforated plate*



Gambar 4.21 Grafik psikrometerik udara pengering pada *perforated plate* beban pengeringan 200 gr

Grafik di atas didapatkan dengan melakukan *plotting* nilai temperatur dan kelembaban udara yang keluar dari *chamber* ke grafik psikrometrik. Nilai rasio kelembaban titik inlet hingga titik menit pertama berturut-turut sebesar 12,06 g water/kg dry air, 14,21 g water/kg dry air, 13,71 g water/kg dry air, 13,50 g water/kg dry air, 12,90 g water/kg dry air, dan 12,84 g water/kg dry air. Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa pada menit pertama udara pengering mengalami proses cooling dan humidifying. Karena apabila ditinjau dari titik inlet, garis dari titik inlet ke titik menit pertama mengarah ke kiri atas pada grafik dimana nilai temperatur udara pengering mengalami penurunan dan nilai kelembaban udara pengering mengalami kenaikan. Selanjutnya untuk titik menit ke-2 hingga titik menit ke-5, udara pengering juga masih mengalami proses cooling dan humidifying jika ditinjau dari titik inlet. Namun seiring bertambahnya waktu, kandungan air yang berhasil dipindahkan dari batubara ke udara pengering semakin berkurang terlihat dari nilai rasio kelembaban udara pada grafik psikrometrik tersebut yang mengalami penurunan.

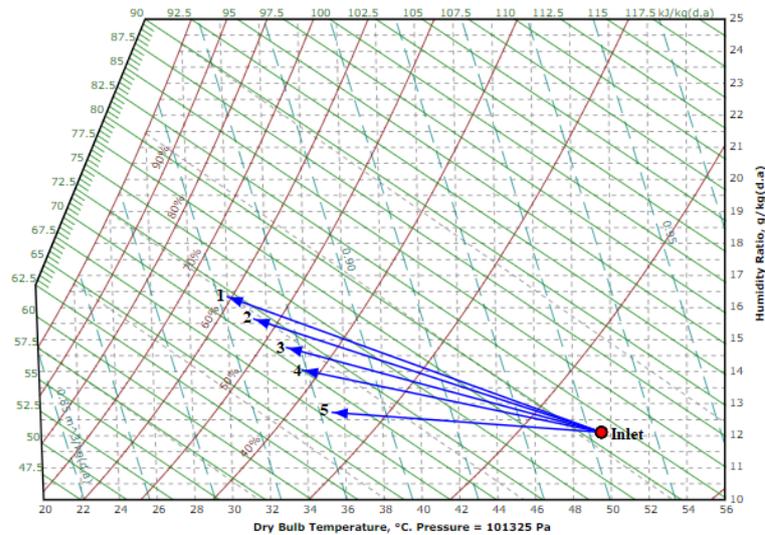
Pada grafik diatas terlihat bahwa penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* pada diameter 5 mm dengan beban pengeringan 200 gr terjadi secara drastis. Contohnya pada menit pertama dan menit kedua yang memiliki selisih sebesar 0,5 g/kg. Hal ini dikarenakan massa air pada batubara lebih sedikit dibanding dengan variasi beban pengeringan yang lain.



Gambar 4.22 Grafik psikrometrik udara pengering pada *perforated plate* beban pengeringan 400 gr

Grafik di atas didapatkan dengan melakukan *plotting* nilai temperatur dan kelembaban udara yang keluar dari *chamber* ke grafik psikrometrik. Nilai rasio kelembaban titik inlet hingga titik menit pertama berturut-turut sebesar 12,06 g *water/kg dry air*, 15,29 g *water/kg dry air*, 14,92 g *water/kg dry air*, 14,7 g *water/kg dry air*, 14,1 g *water/kg dry air*, dan 13,5 g *water/kg dry air*. Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa pada menit pertama udara pengering mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying*. Karena apabila ditinjau dari titik inlet, garis dari titik inlet ke titik menit pertama mengarah ke kiri atas pada grafik dimana nilai temperatur udara pengering mengalami penurunan dan nilai kelembaban udara pengering mengalami kenaikan. Selanjutnya untuk titik menit ke-2 hingga titik menit ke-5, udara pengering juga masih mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying* jika ditinjau dari titik inlet. Namun seiring bertambahnya waktu, kandungan air yang berhasil dipindahkan dari batubara ke udara pengering semakin berkurang terlihat dari nilai rasio kelembaban udara pada grafik psikrometrik tersebut yang mengalami penurunan. Penurunan kandungan air ini menyebabkan nilai temperatur udara pengering akan semakin bertambah dan nilai kelembaban udara pengering tersebut akan semakin berkurang.

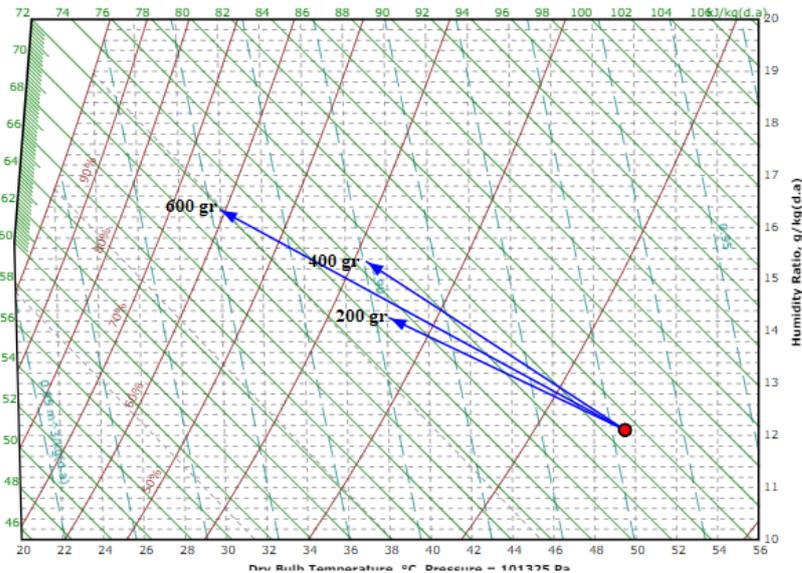
Terlihat pada grafik bahwa penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5 mm pada beban pengeringan 200 gr lebih terlihat daripada saat penggunaan beban pengeringan sebesar 400 gr. Hal ini dikarenakan massa air yang dikandung oleh batubara pada variasi 400 gr lebih banyak.



Gambar 4.23 Grafik psikrometrik udara pengering pada *perforated plate* beban pengeringan 600 gr

Grafik di atas didapatkan dengan melakukan *plotting* nilai temperatur dan kelembaban udara yang keluar dari *chamber* ke grafik psikrometrik. Nilai rasio kelembaban titik inlet hingga titik menit pertama berturut-turut sebesar 12,06 g *water/kg dry air*, 16,28 g *water/kg dry air*, 15,59 g *water/kg dry air*, 14,7 g *water/kg dry air*, 14 g *water/kg dry air*, dan 12,68 g *water/kg dry air*. Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa pada menit pertama udara pengering mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying*. Karena apabila ditinjau dari titik inlet, garis dari titik inlet ke titik menit pertama mengarah ke kiri atas pada grafik dimana nilai temperatur udara pengering mengalami penurunan dan nilai kelembaban udara pengering mengalami kenaikan. Selanjutnya untuk titik menit ke-2 hingga titik menit ke-5, udara pengering juga masih mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying* jika ditinjau dari titik inlet. Namun seiring bertambahnya waktu, kandungan air yang berhasil dipindahkan dari batubara ke udara pengering semakin berkurang terlihat dari nilai rasio kelembaban udara pada grafik psikrometrik tersebut yang mengalami penurunan. Penurunan kandungan air ini menyebabkan nilai temperatur udara pengering akan semakin bertambah dan nilai kelembaban udara pengering tersebut akan semakin berkurang.

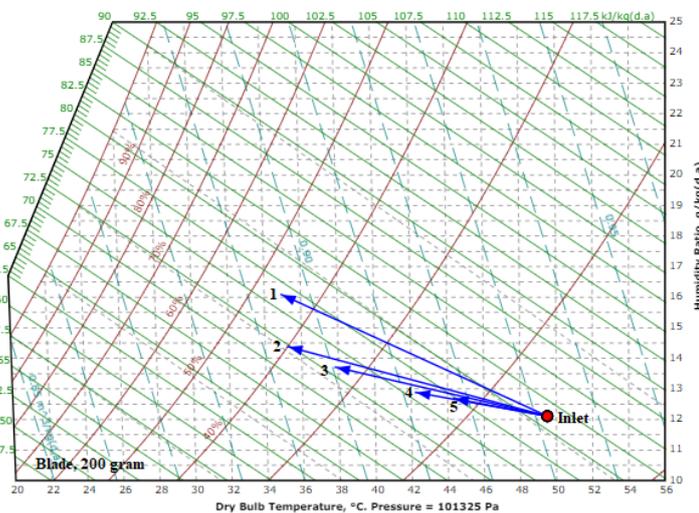
Terlihat pada grafik bahwa penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5 mm pada beban pengeringan 600 gram tidak terjadi secara drastis, hal ini terjadi karena pada beban pengeringan 600 gram kandungan air didalam batubara lebih banyak dibandingkan beban pengeringan 200 gr dan 400 gr.



Gambar 4.24 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada *perforated plate* dengan beban pengeringan 200 gr, 400 gr dan 600 gr

Dari grafik diatas diketahui bahwa nilai rasio kelembaban dari yang terbesar ke yang terkecil pada proses pengeringan adalah 600 gr, 400 gr dan 200 gr, hal ini terjadi dikarenakan semakin besar beban pengeringan batubara maka akan semakin luas area pengeringannya sehingga massa air yang dikandung makin besar.

4.4.5.2 Grafik Psikrometrik Udara Pengering pada *Single row blade*

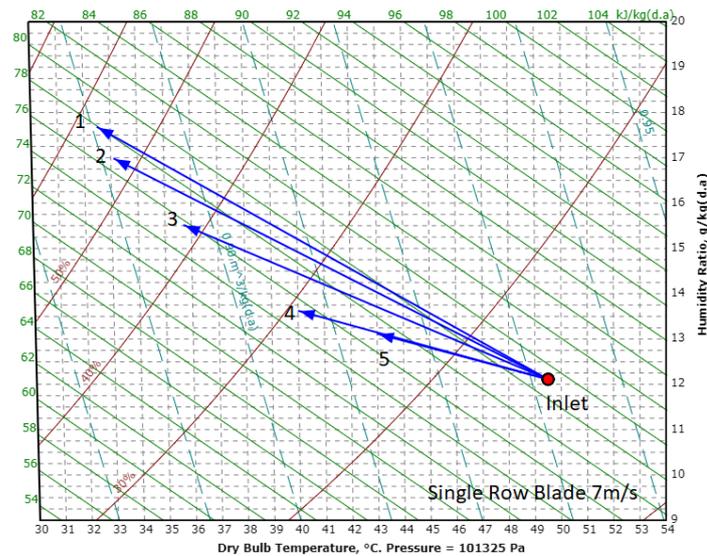


Gambar 4.25 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada *single row blade* dengan beban pengeringan 200 gram

Grafik di atas didapatkan dengan melakukan *plotting* nilai temperatur dan kelembaban udara yang keluar dari *chamber* ke grafik psikrometrik. Nilai rasio kelembaban titik inlet hingga titik menit pertama berturut-turut sebesar 12,06 g water/kg dry air, 16,04 g water/kg dry air, 14,33 g water/kg dry air, 13,67 g water/kg dry air, 12,84 g water/kg dry air, dan 12,64 g water/kg dry air. Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa pada menit pertama udara pengering mengalami proses cooling dan humidifying. Karena apabila ditinjau dari titik inlet, garis dari

titik inlet ke titik menit pertama mengarah ke kiri atas pada grafik dimana nilai temperatur udara pengering mengalami penurunan dan nilai kelembaban udara pengering mengalami kenaikan. Selanjutnya untuk titik menit ke-2 hingga titik menit ke-5, udara pengering juga masih mengalami proses cooling dan humidifying jika ditinjau dari titik inlet. Namun seiring bertambahnya waktu, kandungan air yang berhasil dipindahkan dari batubara ke udara pengering semakin berkurang terlihat dari nilai rasio kelembaban udara pada grafik psikrometrik tersebut yang mengalami penurunan.

Pada grafik diatas terlihat bahwa terjadi penurunan rasio kelembaban secara drastis pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* pada sudut inklinasi 20° dengan beban pengeringan 200 gr dari pada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate*. Hal ini dikarenakan massa air pada batubara lebih sedikit dibanding dengan variasi beban pengeringan yang lain dan udara pengering yang melewati *single row blade* dengan sudut 20° mampu memindahkan lebih banyak kandungan air pada batubara di awal proses pengeringan sehingga penurunan kadar air pada menit selanjutnya dapat lebih terlihat pada grafik psikrometrik tersebut. Hal ini dibuktikan dengan nilai *relative humidity* udara *outlet chamber* pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° dengan beban pengeringan 200 gram lebih kecil daripada nilai *relative humidity* pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm dengan beban pengeringan 200 gram.

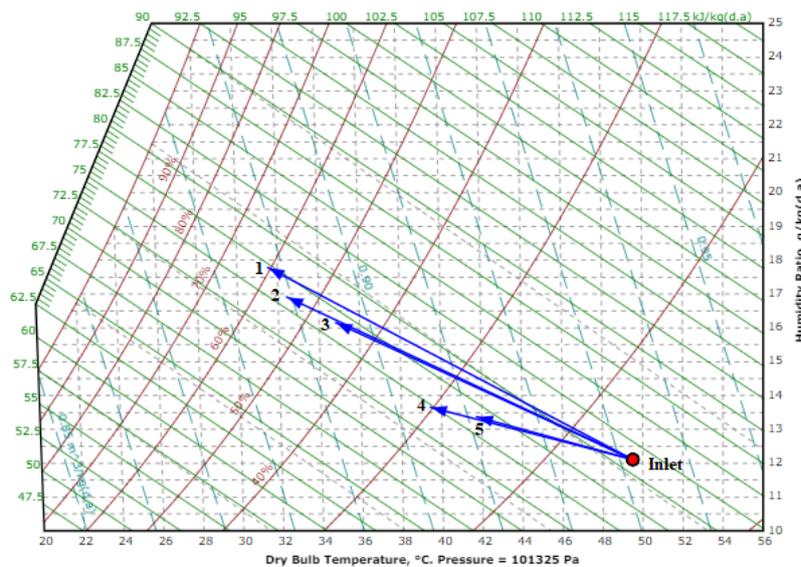


Gambar 4.26 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada *single row blade* dengan beban pengeringan 400 gram

Grafik di atas didapatkan dengan melakukan *plotting* nilai temperatur dan kelembaban udara yang keluar dari *chamber* ke grafik psikrometrik. Nilai rasio kelembaban titik inlet hingga titik menit pertama berturut-turut sebesar 12,06 g *water/kg dry air*, 17,62 g *water/kg dry air*, 16,92 g *water/kg dry air*, 15,46 g *water/kg dry air*, 13,57 g *water/kg dry air*, dan 13,07 g *water/kg dry air*. Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa pada menit pertama udara pengering mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying*. Karena apabila ditinjau dari titik inlet, garis dari titik inlet ke titik menit pertama mengarah ke kiri atas pada grafik dimana nilai temperatur udara pengering mengalami penurunan dan nilai kelembaban udara pengering mengalami kenaikan. Selanjutnya untuk titik menit ke-2 hingga titik menit ke-5, udara

pengering juga masih mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying* jika ditinjau dari titik inlet. Namun seiring bertambahnya waktu, kandungan air yang berhasil dipindahkan dari batubara ke udara pengering semakin berkurang terlihat dari nilai rasio kelembaban udara pada grafik psikrometrik tersebut yang mengalami penurunan. Penurunan kandungan air ini menyebabkan nilai temperetur udara pengering akan semakin bertambah dan nilai kelembaban udara.

Pada grafik diatas terlihat bahwa terjadi penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* pada sudut inklinasi 20° dengan beban pengeringan 400 gr dari pada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate*. Hal ini dikarenakan udara pengering yang melewati *single row blade* dengan sudut 20° mampu memindahkan lebih banyak kandungan air pada batubara di awal proses pengeringan sehingga penurunan kadar air pada menit selanjutnya dapat lebih terlihat pada grafik psikrometrik tersebut. Hal ini dibuktikan dengan nilai *relative humidity* udara *outlet chamber* pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° dengan beban pengeringan 400 gram lebih kecil daripada nilai *relative humidity* pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm dengan beban pengeringan 400 gram.

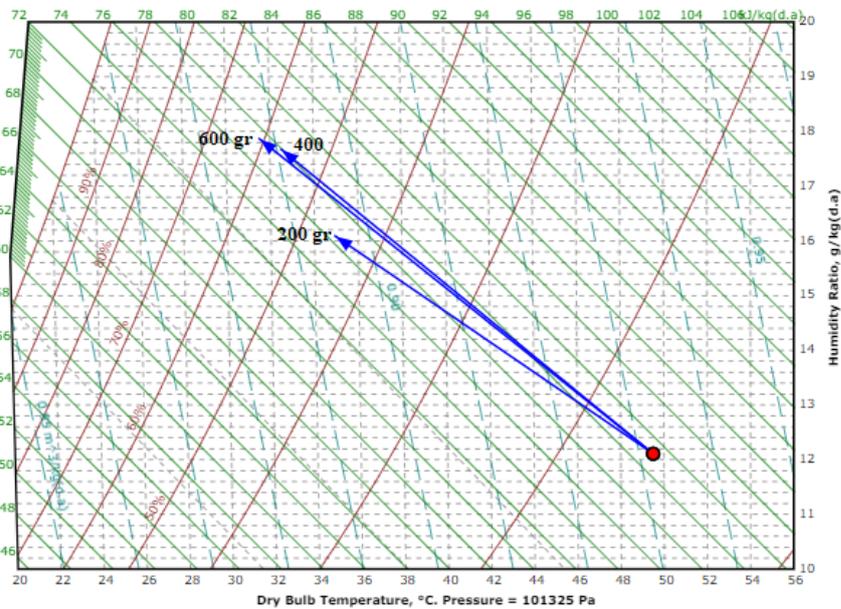


Gambar 4.27 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada *single row blade* dengan beban pengeringan 600 gram

Grafik di atas didapatkan dengan melakukan *plotting* nilai temperatur dan kelembaban udara yang keluar dari *chamber* ke grafik psikrometrik. Nilai rasio kelembaban titik inlet hingga titik menit pertama berturut-turut sebesar 12,06 g *water/kg dry air*, 17,81 g *water/kg dry air*, 16,86 g *water/kg dry air*, 16,10 g *water/kg dry air*, 14,52 g *water/kg dry air*, dan 13,33 g *water/kg dry air*. Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa pada menit pertama udara pengering mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying*. Karena apabila ditinjau dari titik inlet, garis dari titik inlet ke titik menit pertama mengarah ke kiri atas pada grafik dimana nilai temperatur udara pengering mengalami penurunan dan nilai kelembaban udara pengering mengalami kenaikan. Selanjutnya untuk titik menit ke-2 hingga titik menit ke-5, udara pengering juga masih mengalami proses *sensible cooling* dan *humidifying* jika ditinjau dari titik inlet. Namun seiring bertambahnya waktu, kandungan air yang berhasil dipindahkan dari

batubara ke udara pengering semakin berkurang terlihat dari nilai rasio kelembaban udara pada grafik psikrometrik tersebut yang mengalami penurunan. Penurunan kandungan air ini menyebabkan nilai temperetur udara pengering akan semakin bertambah dan nilai kelembaban udara.

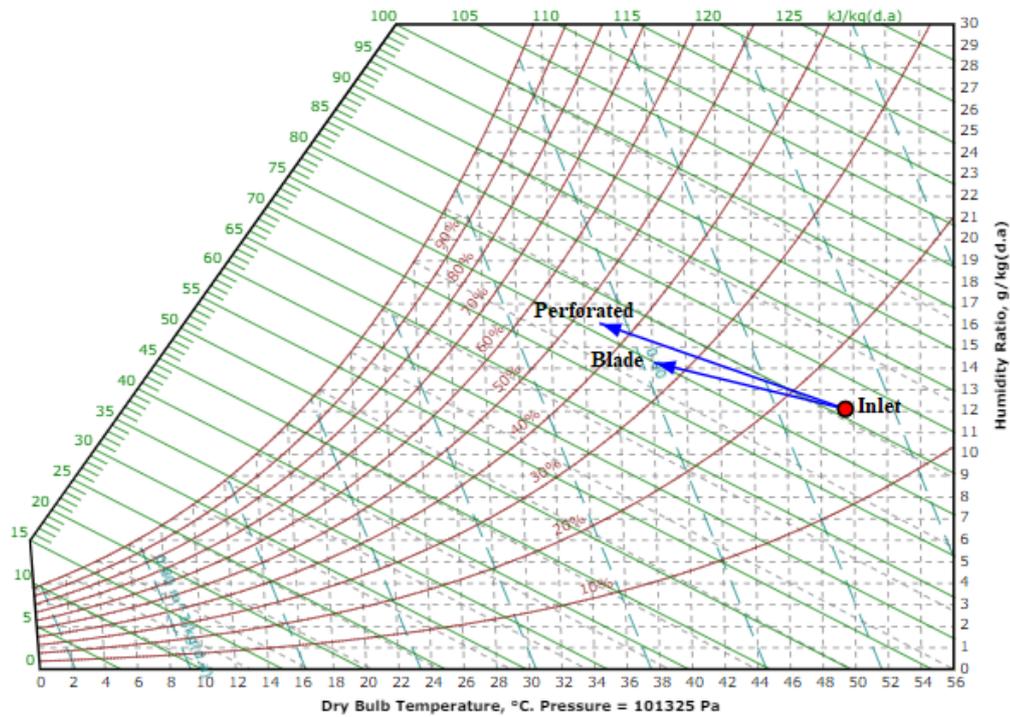
Pada grafik diatas terlihat bahwa terjadi penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* pada sudut inklinasi 20° dengan beban pengeringan 600 gr dari pada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate*. Hal ini dikarenakan udara pengering yang melewati *single row blade* dengan sudut 20° mampu memindahkan lebih banyak kandungan air pada batubara di awal proses pengeringan sehingga penurunan kadar air pada menit selanjutnya dapat lebih terlihat pada grafik psikrometrik tersebut. Hal ini dibuktikan dengan nilai *relative humidity* udara *outlet chamber* pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° dengan beban pengeringan 600 gram lebih kecil daripada nilai *relative humidity* pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm dengan beban pengeringan 600 gram.



Gambar 4.28 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada *single row blade* dengan beban pengeringan 200gram, 400gram dan 600 gram

Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa nilai rasio kelembaban terbesar pada *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° ada beban pengeringan 600 gr diikuti dengan variasi bebang pengeringan 400 gr dan 200 gr. Hal ini berarti bahwa udara pengering yang keluar dari chamber saat pembebanan 600 gr memiliki kandungan uap air paling tinggi. Tingginya uap air pada udara saat keluar chamber pada beban 600gr dikarenakan massa air yang terkandung dalam beban 600 gr lebih banyak, sehingga uap air yang terserap oleh udara pengering juga ikut meningkat.

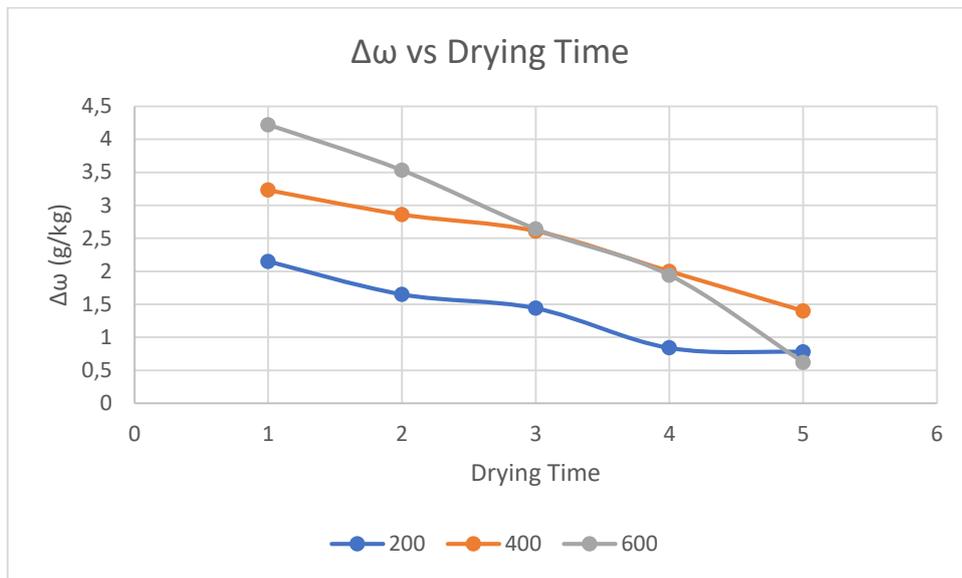
4.4.5.3 Perbandingan Grafik Psikrometrik Udara Pengering pada *Perforated plate* vs *Single row blade*



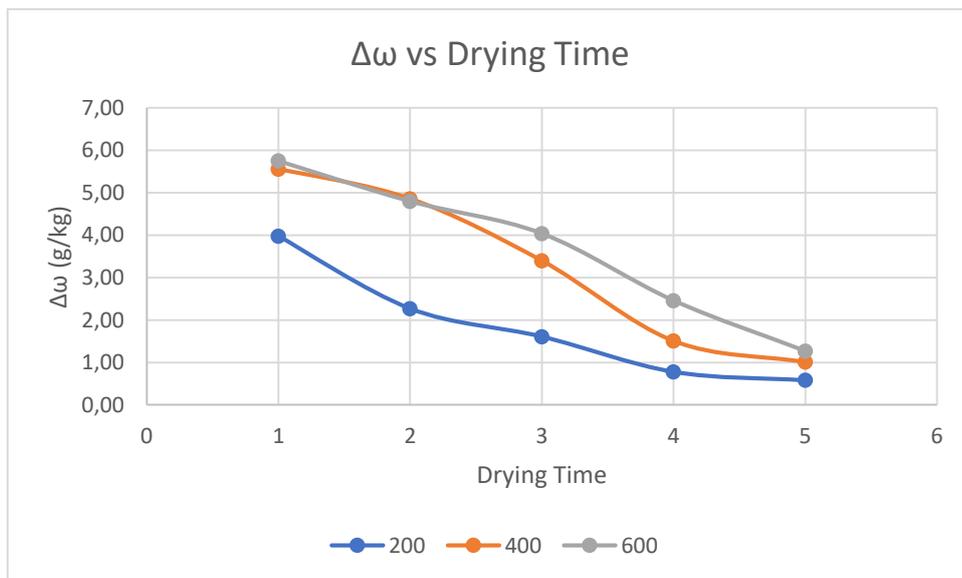
Gambar 4.29 Perbandingan grafik psikrometrik udara pengering pada *perforated plate* vs *single row blade* dengan beban pengeringan 200 gram

Dari grafik di atas, terlihat bahwa penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° dengan beban pengeringan 200 gram memiliki nilai rasio kelembaban udara pengering yang lebih rendah daripada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5 mm pada beban pengeringan yang sama di menit pertama proses pengeringan. Hal ini berarti bahwa penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada beban pengeringan 200 gram adalah yang paling optimal untuk proses pengeringan batubara. Fenomena ini terjadi karena nilai *humidity ratio* pada *bed* pengeringan jenis *single row blade* lebih rendah dibanding *perforated plate*.

4.4.6 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Selisih Humidity Ratio Fungsi Drying Time



Gambar 4.30 Pengaruh beban pengeringan terhadap *humidity ratio* fungsi waktu pada *perforated plate*

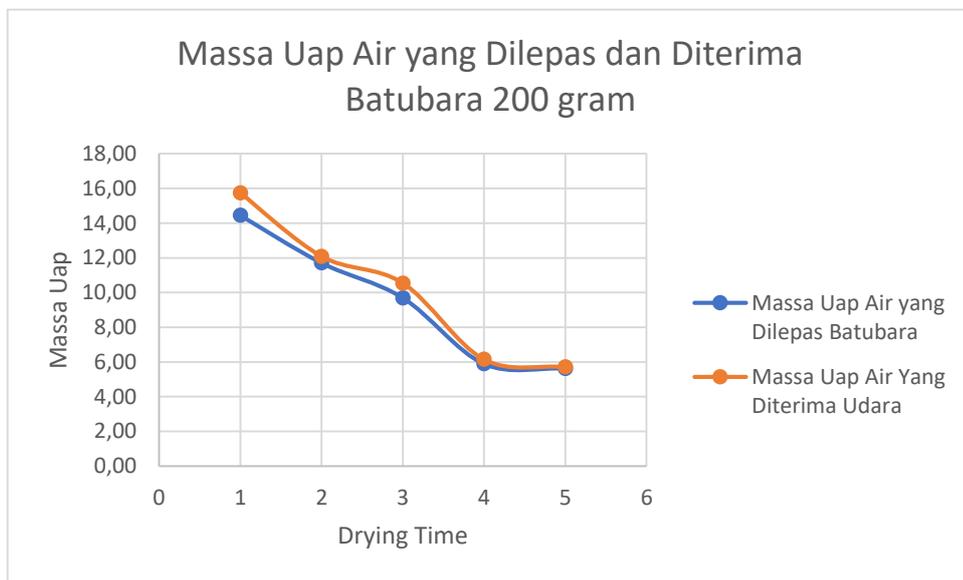


Gambar 4.31 Pengaruh beban pengeringan terhadap *humidity ratio* fungsi waktu pada *single row blade*

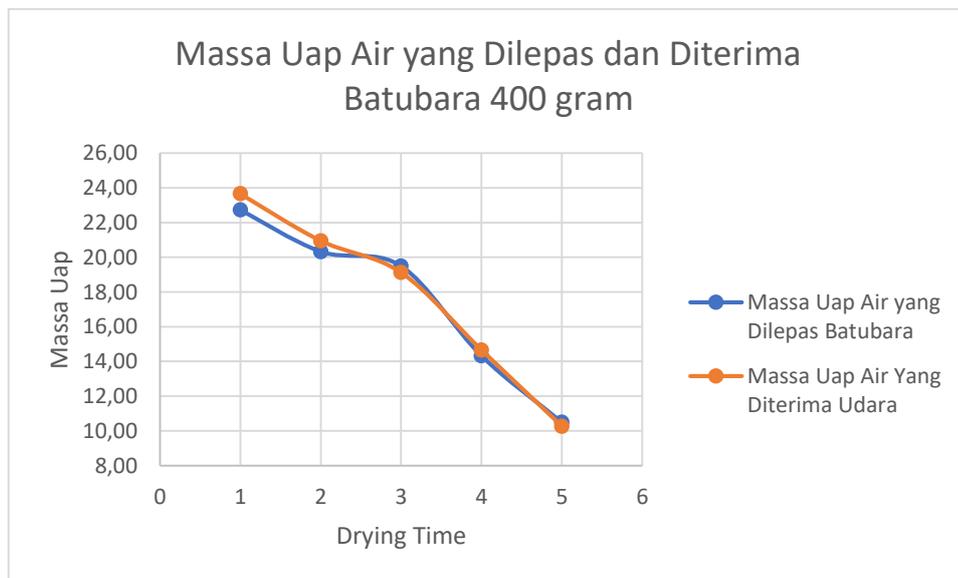
Humidity ratio sendiri adalah massa air yang terkandung pada setiap kilogram udara kering, untuk humidity ratio udara dapat ditentukan berdasarkan 1 kilogram udara kering. Pada gambar diatas memiliki trend menurun untuk setiap variasi beban pengeringan. Udara yang menerima uap air terus berkurang seiring berjalannya waktu saat proses pengeringan, pada beban pengeringan 200 gram nilai humidity ratio ($\Delta\omega$) mengalami penurunan lebih tinggi jika dibandingkan dengan beban pengeringan 400 gram dan 600 gram. Pada *perforated plate* beban pengeringan 200 gram mempunyai nilai humidity ratio ($\Delta\omega$) sebesar 2,15 g/kg pada menit ke-1, beban pengeringan 400 gram mempunyai nilai humidity ratio sebesar 3,32 g/kg, dan beban

pengeringan 600 gram mempunyai nilai humidity ratio sebesar 4,22 g/kg. Untuk *single row blade* beban pengeringan 200 gram mempunyai nilai humidity ratio ($\Delta\omega$) sebesar 3,98 g/kg pada menit ke-1, beban pengeringan 400 gram mempunyai nilai humidity ratio sebesar 5,56 g/kg, dan beban pengeringan 600 gram mempunyai nilai humidity ratio sebesar 5,75 g/kg. Yang terjadi pada menit ke-1 sampai dengan menit ke-5 humidity ratio mengalami penurunan yang signifikan, hal ini dikarenakan proses pengeringan maksimal terjadi pada rentang waktu tersebut. Jika waktu pengeringan diperpanjang maka selisih humidity ratio akan relatif konstan, hal ini menunjukkan bahwa proses pengeringan yang terjadi tidak banyak karena kandungan moisture content pada batubara tersisa sedikit sehingga uap air yang berpindah ke udara juga sedikit.

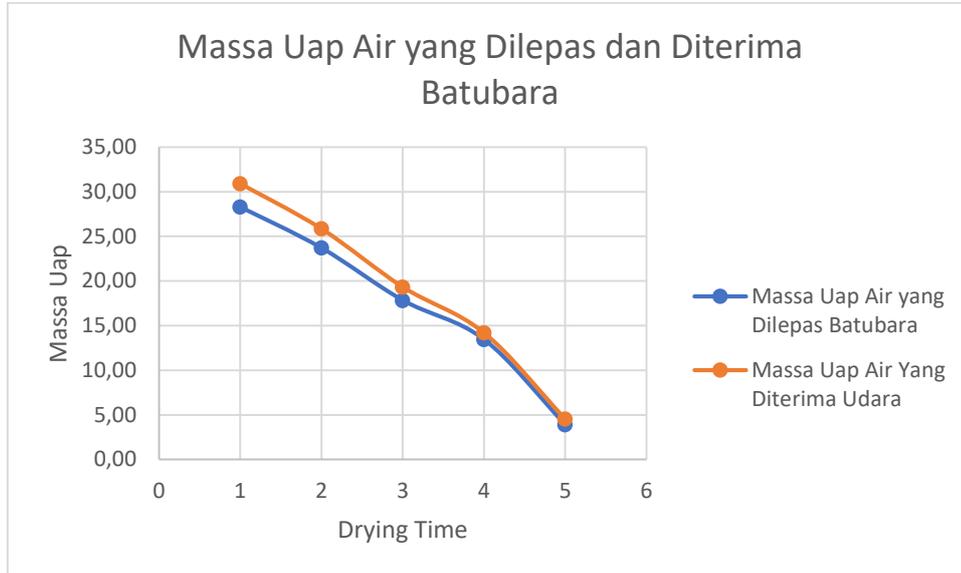
4.5 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi *Perforated plate*



Gambar 4.32 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 200 gram



Gambar 4.33 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 400 gram

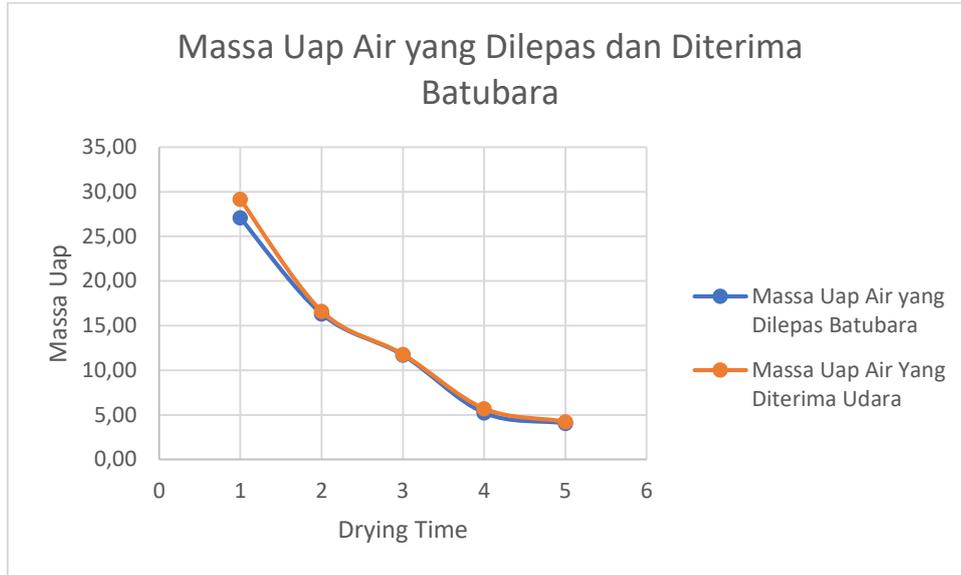


Gambar 4.34 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 600 gram

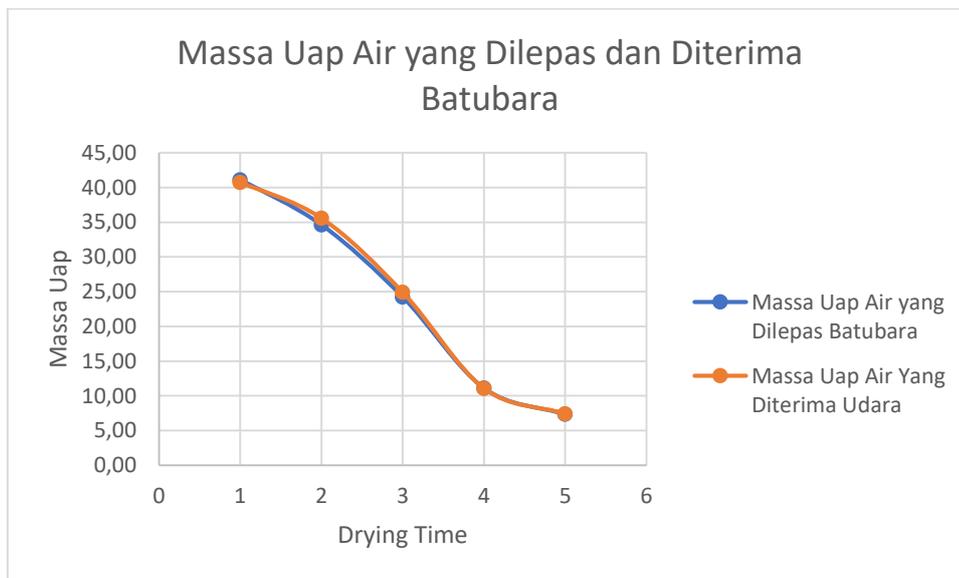
Grafik diatas merupakan perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi drying time. Didapatkan trend grafik yang menurun, hal ini menunjukkan bahwa uap air yang berpindah dari batubara akan berkurang seiring dengan berjalannya proses pengeringan sehingga mengakibatkan udara menyerap uap air akan berkurang juga seiring berjalannya proses pengeringan. Dengan beban pengeringan 200 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 14,45 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 15,75 gram. Untuk beban pengeringan 400 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 22,73 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 23,66 gram. Untuk beban pengeringan 600 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 28,30 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 30,91 gram. Nilai massa uap air yang berpindah dapat dihitung berdasarkan *moisture content* dari batubara.

Dari hasil percobaan trend grafik yang didapatkan mengalami penurunan mulai dari menit ke-1 sampai menit ke-5, penurunan yang terjadi pada grafik menunjukkan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara cukup banyak pada menit ke-1 sampai dengan menit ke-5. Secara teori besarnya massa uap air yang dilepas dari batubara menuju udara seharusnya sama, tetapi dalam percobaan yang telah dilakukan terjadi perbedaan. Hal ini dikarenakan human error saat pengambilan dan pengamatan data, serta alat ukur yang kurang akurat.

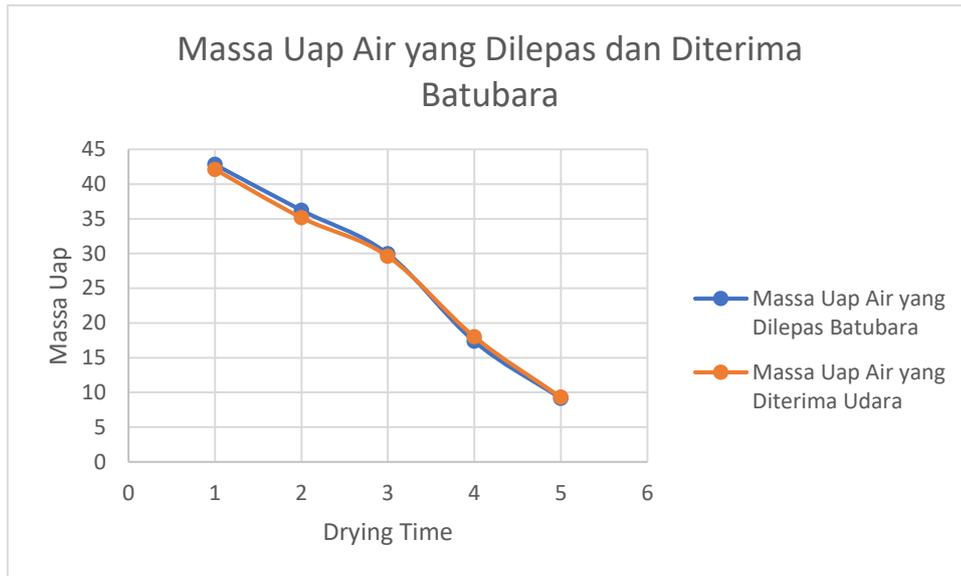
4.6 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi *Single row blade*



Gambar 4.35 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 200 gram



Gambar 4.36 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 400 gram

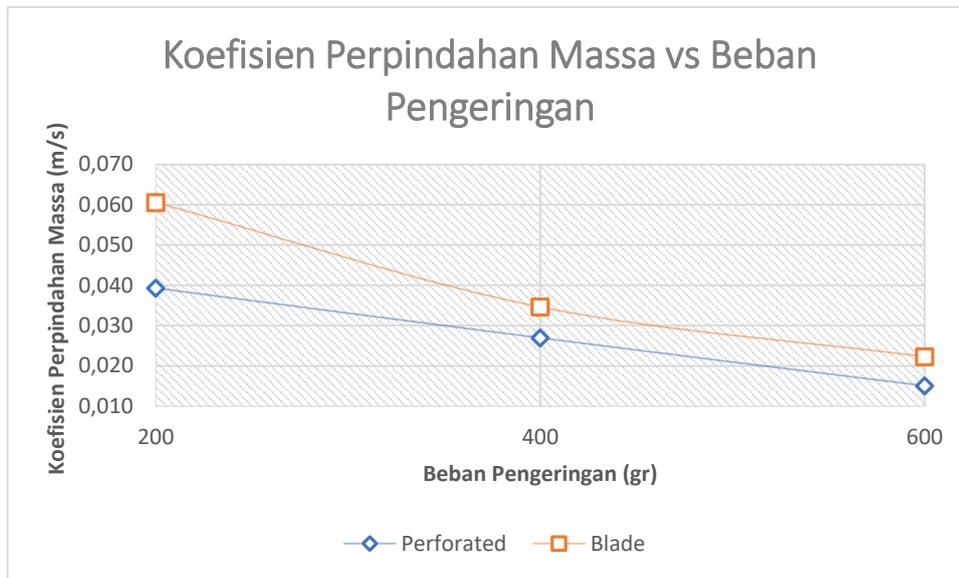


Gambar 4.37 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi waktu pada beban 600 gram

Grafik diatas merupakan perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi drying time. Didapatkan trend grafik yang menurun, hal ini menunjukkan bahwa uap air yang berpindah dari batubara akan berkurang seiring dengan berjalannya proses pengeringan sehingga mengakibatkan udara menyerap uap air akan berkurang juga seiring berjalannya proses pengeringan. Dengan beban pengeringan 200 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 27,09 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 29,15 gram. Untuk beban pengeringan 400 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 41,11 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 40,72 gram. Untuk beban pengeringan 600 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 42,82 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 42,11 gram. Nilai massa uap air yang berpindah dapat dihitung berdasarkan *moisture content* dari batubara.

Dari hasil percobaan trend grafik yang didapatkan mengalami penurunan mulai dari menit ke-1 sampai menit ke-5, penurunan yang terjadi pada grafik menunjukkan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara cukup banyak pada menit ke-1 sampai dengan menit ke-5. Secara teori besarnya massa uap air yang dilepas dari batubara menuju udara seharusnya sama, tetapi dalam percobaan yang telah dilakukan terjadi perbedaan. Hal ini dikarenakan human error saat pengambilan dan pengamatan data, serta alat ukur yang kurang akurat.

4.7 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Koefisien Perpindahan Massa



Gambar 4.38 Pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan massa aktual pada *perforated plate* dan *single row blade*

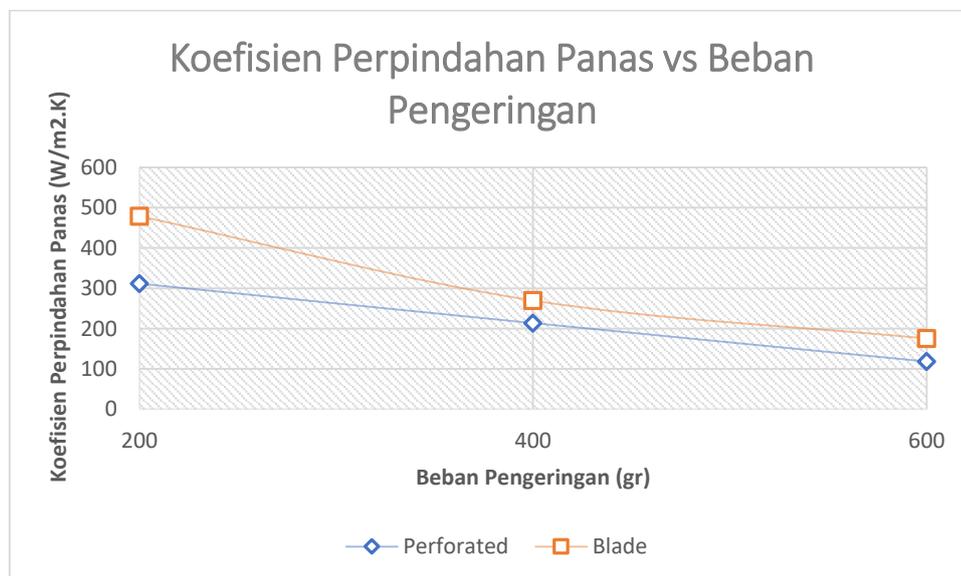
Perpindahan massa adalah proses perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering, dalam gambar 4.38 dapat dilihat grafik pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan massa dengan variasi beban pengeringan 200 gram, 400 gram, dan 600 gram. Pada penggunaan bed pengeringan jenis *perforated plate* dengan beban pengeringan 200 gram nilai dari koefisien perpindahan massa sebesar 0,03933 m/s, beban pengeringan 500 gram mempunyai nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,02695 m/s dan beban pengeringan 600 gram mempunyai nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,015054 m/s. Kemudian pada penggunaan bed jenis *single row blade* dengan beban pengeringan 200 gram nilai dari koefisien perpindahan massa sebesar 0,0605 m/s, beban pengeringan 500 gram mempunyai nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,0346 m/s dan beban pengeringan 600 gram mempunyai nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,02222 m/s.

Dari grafik ditunjukkan trend yaitu semakin bertambahnya beban pengeringan maka nilai koefisien perpindahan massa akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada permukaan batubara. Daya serap menurun maka laju pengeringan akan menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah beban yang lebih kecil. Lalu pengaruh dari hubungan antara variasi beban dengan nilai koefisien perpindahan massa, dimana semakin banyak jumlah beban pengeringan maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan massanya. Penggunaan 2 jenis *bed* yang berbeda yaitu *perforated plate* diameter 5 mm dan *single row blade* sudut 20° terlihat menghasilkan nilai koefisien perpindahan massa yang berbeda dimana nilai koefisien perpindahan massa batubara pada saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* sudut 20° akan lebih besar daripada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* dengan diameter

sebesar 5mm. Dari fenomena ini, dapat disimpulkan bahwa laju perpindahan massa pada saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* sudut 20° akan lebih besar daripada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* dengan diameter sebesar 5mm. Pada gambar diatas diketahui untuk beban pengeringan 200 gram pada *bed* jenis pengeringan *single row blade* mempunyai nilai koefisien perpindahan massa paling besar.

4.8 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan terhadap Koefisien Perpindahan Panas

Nilai koefisien perpindahan panas pada proses pengeringan didapatkan melalui *properties* saat *drying bed* belum terpasang pada *drying chamber* sehingga untuk dua jenis *bed* pengeringan nilainya akan sama. Pada eksperimen kali ini digunakan kecepatan yang konstan sebesar 7m/s, sehingga nilai dari koefisien perpindahan panasnya akan konstan pada setiap variasi pembebanan. Untuk nilai perpindahan koefisien perpindahan panas teoritis memiliki nilai sebesar $145,22 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nilai koefisien perpindahan panas bisa didapatkan dari *reynold number* dan nilai dari *reynold number* akan memengaruhi *nusselt number*.



Gambar 4.39 Pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan panas aktual pada *perforated plate* dan *single row blade*

Dari grafik pada Gambar 4.39, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan panas pada beban pengeringan sebesar 200 gr, 400 gr dan 600 gr dengan jenis *bed* pengeringan *perforated plate* berturut-turut bernilai $311,64 \text{ W/m}^2\text{K}$, $213,81 \text{ W/m}^2\text{K}$, dan $118,61 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kemudian untuk *bed* jenis pengeringan *single row blade* memiliki nilai sebesar $478,49 \text{ W/m}^2\text{K}$, $269,75 \text{ W/m}^2\text{K}$, dan $175,56 \text{ W/m}^2\text{K}$. Terlihat bahwa trend nilai koefisien perpindahan panas pada Gambar 4.39 mengalami penurunan ketika beban pengeringan bertambah. Hal ini sesuai dengan teori dimana semakin besar beban pengeringan batubara maka akan semakin besar luas permukaan batubara yang perlu dikeringkan.

Terlihat dari grafik pada Gambar 4.39 bahwa nilai koefisien perpindahan panas tertinggi terjadi ketika proses pengeringan pada beban pengeringan 200 gr dengan menggunakan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° . Hal ini mengindikasikan bahwa proses pengeringan batubara saat penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° pada beban pengeringan 200 gr merupakan yang paling optimal proses pengeringan. Hal ini dibuktikan dengan nilai *moisture*

content pada batubara yang lebih rendah saat pengeringan menggunakan *single row blade* pada beban pengeringan 200 gr.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan dan analisa data hasil eksperimen yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal yang menjadi hasil dari eksperimen ini yaitu sebagai berikut:

1. Dari penggunaan 2 jenis bed pengeringan yaitu *perforated plate* diameter 5mm dan *single row blade* sudut 20° pada variasi beban pengeringan sebesar 200 gram, 400 gram dan 600 gram, didapatkan hasil yang paling optimal pada penggunaan bed jenis *single row blade* sudut 20° dengan beban pengeringan sebesar 200 gram. Dalam proses pengeringan didapatkan temperatur tertinggi pada sisi outlet udara pengering sebesar 44,30°C dan nilai kelembaban terendah pada sisi outlet udara pengering sebesar 21,8%. Fenomena ini terjadi karena luas permukaan pada variasi 200 gram lebih kecil dibandingkan dengan variasi 400 gram dan 600 gram sehingga kandungan air pada batubara menjadi lebih sedikit dan waktu pengeringan menjadi lebih cepat. Jenis bed yaitu *single row blade* juga memengaruhi dalam proses pengeringan, sudut pada bed menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga reynold numbernya mengalami peningkatan. Peningkatan *Reynold Number* mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa juga mengalami peningkatan. Sehingga, laju perpindahan panas dan massa batubara akan semakin besar. Hal ini dibuktikan dengan nilai *moisture content* pada batubara yang lebih rendah saat pengeringan menggunakan *single row blade* pada beban pengeringan 200 gram.
2. Setelah melakukan *plotting* properti temperature dan kelembaban udara pada *psychrometric chart*, terlihat bahwa udara pengeringan mengalami 2 proses yaitu proses *sensible heating* yang dibuktikan dengan garis ke arah kanan pada *psychrometric chart* akibat perpindahan panas antara udara pengering yang akan memasuki *inlet drying chamber* dan air panas yang dialirkan ke *heat exchanger* untuk memudahkan proses pengeringan. Kemudian udara pengering yang telah memasuki *drying chamber* akan mengalami proses *cooling and humidifying* yang dibuktikan dengan garis ke arah kiri atas pada *psychrometric chart* akibat adanya perpindahan panas dan perpindahan massa air dari batubara ke udara pengering inlet yang melewati batubara tersebut dan kemudian menuju ke sisi outlet *drying chamber*.
3. Semakin besar jumlah beban pengeringan maka temperatur outlet dari udara pengering akan semakin kecil. Temperatur paling rendah saat keluar dari chamber adalah 31,5 °C untuk beban pengeringan 600 gram.
4. Total penurunan jumlah *moisture content* paling banyak dalam waktu pengeringan selama 5 menit dicapai oleh proses pengeringan dengan beban pengeringan sebesar 200 gram pada penggunaan bed jenis *single row blade* sudut 20° yaitu sebesar 32%. Fenomena ini terjadi karena semakin kecil beban pengeringan maka akan semakin besar pula koefisien perpindahan panas dan perpindahan massanya sehingga laju perpindahan panas dan perpindahan massa air batubara akan semakin cepat. Penggunaan bed jenis *single row blade* sudut 20° juga mengakibatkan terjadinya kenaikan sudut pada aliran udara pengering yang melewati bed tersebut sehingga alirannya semakin turbulen dan kecepatan alirannya bertambah.

5. Dari ketiga variasi beban pengeringan yang telah ditentukan, koefisien perpindahan massa yang paling besar terjadi pada beban pengeringan 200 gram dengan jenis bed pengeringan *single row blade* dengan nilai koefisien sebesar 0,06053 m/s.

5.2 Saran

Berdasarkan eksperimen yang telah berhasil dilakukan, berikut ini merupakan saran untuk mengurangi perbedaan nilai yang terjadi pada hasil eksperimen.

1. Penimbangan massa *sample* batubara dapat dilakukan dengan timbangan yang memiliki skala yang lebih kecil untuk meningkatkan ketelitian dan keakuratan data.
2. Penyimpanan massa *sample* batubara dapat lebih diperhatikan agar nilai *moisture content* batubara tersebut tidak berubah.
3. Peneliti sebaiknya menggunakan sarung tangan *lateks* selama proses eksperimen berlangsung agar nilai *moisture content sample* tidak terpengaruh.
4. Penyaringan ukuran partikel batubara dapat menggunakan 2 *mesh* yang ukurannya lebih mendekati dengan diameter batubara yang ingin dikeringkan.
5. Adanya perawatan alat eksperimen agar data hasil eksperimen lebih akurat.
6. Adanya kalibrasi dan perawatan alat ukur.
7. Ruang eksperimen harus selalu dalam rentang temperatur dan kelembaban yang sama melalui pengkondisian udara agar data hasil eksperimen lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmmad Shukrie Md Yudin, V. R. (2011). A Mathematical Model for Residence Time Distribution Analysis in Swirling Fluidized Bed. Bandar Seri Iskandar: Department of Mechanical Engineering and Department of Fundamental and Applied Sciences Universiti Teknologi PETRONAS,.
- Ayuhati, K. (2018). Menguak Potensi Batubara Metalurgi, Batubara dengan Harga Jual Tinggi. Bandung: Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Bill Rehm, A. H. (2009). CHAPTER TWO Situational Problems in MPD. In *Managed Pressure Drilling* (p. 59). Elsevier Inc.
- Camuffo, D. (2019). Chapter 11 - Dry Deposition of Airborne Particulate Matter—Mechanisms and Effects. In *Microclimate for Cultural Heritage (Third Edition)* (p. 201). Elsevier B.V.
- EILEEN E. FABIAN (WHEELER), P. (2016). Psychrometric Chart Use. Penn State University Park: College of Agricultural Sciences The Pennsylvania State University.
- ESDM. (2008). Peningkatan Kualitas Batubara Melalui Proses UBC. Jakarta: Kementrian ESDM Republik Indonesia.
- ESDM, B. G. (2021). Sumber Daya Dan Cadangan Batubara Indonesia. Bandung: Badan Geologi Kementrian ESDM.
- Harekrushna Sutar, V. K. (2012). THE EFFECT OF DISTRIBUTOR DESIGN ON HYDRODYNAMICS OF CONICAL FLUIDIZED BED DRYER. *International Journal of Current Research*, 4(09), 1, 2, 5.
- Incropera, D. W. (2005). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer Sixth Edition*. John Wiley & Sons Inc.
- Iudhi Oki Prahesthi, F. Z. (2015). PENYUSUNAN STANDAR OPERASIONAL PROSEDUR (SOP) ANALISIS KIMIA . Pusat Sumber Daya Geologi Kementrian ESDM Republik Indonesia.
- Lasode, O. A. (2020). Mixed Convection Heat Transfer in Rotating Elliptic Coolant Channels. Woodhead Publishing.
- Peng Jia, E. W. (2013). *AIP Conference Proceedings*, 2.

- Ross Montgomery P.E., a. R. (2008). Chapter 4 Sensors and Auxiliary Devices. In *Fundamentals of HVAC Control Systems* (p. 118). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Suharyati, S. H. (2019). *Outlook Energi Indonesia 2019*. Jakarta: Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional.
- Theodore L. Bergman, A. S. (2008). Introduction to Convection. In *Fundamentals of Heat and Mass Transfer Seventh Edition* (p. 402). John Wiley & Sons Inc.
- WajihHasan, B. B. (2019). Full-Scale Membrane Distillation Systems and Performance Improvement Through Modeling. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (p. 119). Elsevier Inc.

LAMPIRAN

t	Mwett (gram)	Mdry (gram)	MC (%)	Rhin (%)	Tin (°C)	Rh out (%)	T out (°C)	ω in (g air/kg dry air)	ω out (g air/kg dry air)	$\Delta\omega$	m dry air (kg)	\dot{m} (kg/s)	m H2O (gr)
0	3,009	1,99	34	16	49,5			12,06					
1	0,702	0,515	27	16	49,5	34,00	38,07	12,06	14,21	2,15	14,45	0,12	15,75
2	0,919	0,728	21	16	49,5	31,03	39,19	12,06	13,71	1,65	11,71	0,12	12,09
3	1,136	0,955	16	16	49,5	25,71	42,37	12,06	13,5	1,44	9,70	0,12	10,55
4	1,109	0,965	13	16	49,5	23,71	43,07	12,06	12,9	0,84	5,90	0,12	6,15
5	1,042	0,936	10	16	49,5	21,66	44,73	12,06	12,84	0,78	5,62	0,12	5,71

Tabel A.1 Lembar Pengambilan Data *Perforated plate* Diameter 5mm Beban Pengeringan 200 gram

t	Mwett (gram)	Mdry (gram)	MC (%)	Rhin (%)	Tin (°C)	Rh out (%)	T out (°C)	ω in (g air/kg dry air)	ω out (g air/kg dry air)	$\Delta\omega$	m dry air (kg)	\dot{m} (kg/s)	m H2O (gr)
0	3,009	1,99	34	16	49,5			12,06					
1	1,618	1,162	28	16	49,5	38,7	37,0	12,06	15,29	3,23	22,73	0,12	23,66
2	0,896	0,689	23	16	49,5	35,4	38,2	12,06	14,92	2,86	20,32	0,12	20,95
3	0,735	0,601	18	16	49,5	33,9	38,7	12,06	14,7	2,61	19,49	0,12	19,12
4	1,249	1,066	15	16	49,5	32,0	39,0	12,06	14,1	2	14,32	0,12	14,65
5	1,222	1,075	12	16	49,5	30,0	39,4	12,06	13,5	1,4	10,49	0,12	10,26

Tabel A.2 Lembar Pengambilan Data *Perforated plate* Diameter 5mm Beban Pengeringan 400 gram

t	Mwett (gram)	Mdry (gram)	MC (%)	Rhin (%)	Tin (°C)	Rh out (%)	T out (°C)	ω in (g air/kg dry air)	ω out (g air/kg dry air)	$\Delta\omega$	m dry air (kg)	\dot{m} (kg/s)	m H2O (gr)
0	3,009	1,99	34	16	49,5			12,06					
1	1,856	1,315	29	16	49,5	61,00	29,96	12,06	16,28	4,22	28,30	0,12	30,91
2	1,401	1,048	25	16	49,5	54,06	31,33	12,06	15,59	3,53	23,71	0,12	25,86
3	1,944	1,512	22	16	49,5	46,49	32,99	12,06	14,70	2,64	17,84	0,12	19,34
4	1,857	1,486	20	16	49,5	42,36	33,80	12,06	14,00	1,94	13,46	0,12	14,21
5	1,573	1,269	19	16	49,5	35,36	35,31	12,06	12,68	0,62	3,91	0,12	4,54

Tabel A.3 Lembar Pengambilan Data *Perforated plate* Diameter 5mm Beban Pengeringan 600 gram

t	Mwett (gram)	Mdry (gram)	MC (%)	Rhin (%)	Tin (°C)	Rh out (%)	T out (°C)	ω in (g air/kg dry air)	ω out (g air/kg dry air)	$\Delta\omega$	m dry air (kg)	\dot{m} (kg/s)	m H2O (gr)
0	3,009	1,99	34	16	49,5			12,06					
1	0,438	0,349	20	16	49,5	45,5	34,90	12,06	16,04	3,98	27,09	0,12356	29,15
2	0,823	0,723	12	16	49,5	40,1	35,20	12,06	14,33	2,27	16,34	0,12356	16,63
3	0,874	0,819	6	16	49,5	33,2	37,80	12,06	13,67	1,61	11,72	0,12356	11,79
4	0,981	0,945	4	16	49,5	24,7	42,20	12,06	12,84	0,78	5,25	0,12356	5,71
5	0,795	0,782	2	16	49,5	21,8	44,30	12,06	12,64	0,58	4,07	0,12356	4,25

Tabel A.4 Lembar Pengambilan Data *Single row blade* Sudut Inliknasi 20° Beban Pengeringan 200 gram

t	Mwett (gram)	Mdry (gram)	MC (%)	Rhin (%)	Tin (°C)	Rh out (%)	T out (°C)	ω in (g air/kg dry air)	ω out (g air/kg dry air)	$\Delta\omega$	m dry air (kg)	\dot{m} (kg/s)	m H2O (gr)
0	3,009	1,99	34	16	49,50			12,06					
1	0,814	0,622	24	16	49,50	57	32,5	12,06	17,62	5,56	41,11	0,12356	40,727066
2	1,105	0,94	15	16	49,50	53	33,1	12,06	16,92	4,86	34,62	0,12356	35,599558
3	0,879	0,801	9	16	49,50	42	35,7	12,06	15,46	3,4	24,23	0,12356	24,905041
4	0,656	0,616	6	16	49,50	29,3	40	12,06	13,57	1,51	11,10	0,12356	11,060768
5	0,961	0,92	4	16	49,50	24,1	43	12,06	13,07	1,01	7,32	0,12356	7,3982621

Tabel A.5 Lembar Pengambilan Data *Single row blade* Sudut Inliknasi 20° Beban Pengeringan 400 gram

t	Mwett (gram)	Mdry (gram)	MC (%)	Rhin (%)	Tin (°C)	Rh out (%)	T out (°C)	ω in (g air/kg dry air)	ω out (g air/kg dry air)	$\Delta\omega$	m dry air (kg)	\dot{m} (kg/s)	m H2O (gr)
0	3,009	1,99	34	16	49,5			12,06					
1	1,882	1,379	27	16	49,5	60,96	31,5	12,06	17,81	5,75	42,82911097	0,12356	42,11881875
2	1,89	1,499	21	16	49,5	54,92	32,4	12,06	16,86	4,80	36,23433362	0,12356	35,16005739
3	1,956	1,649	16	16	49,5	45,93	34,8	12,06	16,10	4,04	29,95520499	0,12356	29,5930483
4	1,07	0,933	13	16	49,5	30,31	39,41	12,06	14,52	2,46	17,34934923	0,12356	18,01952941
5	1,259	1,117	11	16	49,5	26,3	41,7	12,06	13,33	1,27	9,149673751	0,12356	9,302765184

Tabel A.6 Lembar Pengambilan Data *Single row blade* Sudut Inliknasi 20° Beban Pengeringan 600 gram

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	D (m)	T_s (°K)	ρA_s (kg/m ³)	ρA_{∞} (kg/m ³)	hg (Kj/Kg)	hf (Kj/Kg)	hfg (Kj/Kg)	hm (m/s)
1	322,5	200	7	0,00475	311,22	1,124	1,0869	2590,1	206,62	2383480	0,01832819
2	322,5	400	7	0,00475	310,15	1,128	1,0869	2590,1	206,62	2383480	0,01830909
3	322,5	600	7	0,00475	303,11	1,151	1,0869	2590,1	206,62	2383480	0,01843153

Tabel A.7 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis pada *Perforated plate* Diameter 5mm

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	A_s (m ²)	mdot udara (kg/s)	$\Delta\omega$ (g/kg)	nA (kg/s)	n (biji)	ρA_s (kg/m ³)	ρA_{∞} (kg/m ³)	hm (m/s)
1	322,5	200	7	0,17492901	0,12	2,15	0,000258	2469	1,124	1,0869	0,0393302
2	322,5	400	7	0,34985802	0,12	3,23	0,0003876	4938	1,128	1,0869	0,0269557
3	322,5	600	7	0,52478704	0,12	4,22	0,0005064	7407	1,151	1,0869	0,0150540

Tabel A.8 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Aktual pada *Perforated plate* Diameter 5mm

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	D (m)	ρ (kg/m ³)	μ (N.s/m ²)	v (m ² /s)	Re	Pr	Nud	k (W/m.K)	h (W/m ² .K)
1	322,5	200	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1,7757E-05	1872,505	0,73	25,085	0,0275	145,228947
2	322,5	400	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1,7757E-05	1872,505	0,73	25,085	0,0275	145,228947
3	322,5	600	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1,7757E-05	1872,505	0,73	25,085	0,0275	145,228947

Tabel A.9 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis pada *Perforated plate* Diameter 5mm

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	D (m)	ρ (kg/m ³)	μ (N.s/m ²)	q	mair (kg)	k (W/m.K)	h (W/m ² .K)
1	322,5	200	7	0,00475	1,0994	0,000019522	286,5656514	0,054	0,0275	311,645079
2	322,5	400	7	0,00475	1,0994	0,000019522	627,4974813	0,112	0,0275	213,81417
3	322,5	600	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1477,794676	0,174	0,0275	118,61628

Tabel A.10 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Aktual pada *Perforated plate* Diameter 5mm

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	D (m)	T_s (°K)	ρ_{As} (kg/m ³)	$\rho_{A\infty}$ (kg/m ³)	hg (Kj/Kg)	hf (Kj/Kg)	hfg (Kj/Kg)	hm (m/s)
1	322,5	200	7	0,00475	308,90	1,132	1,0869	2590,1	206,62	2383480	0,01837401
2	322,5	400	7	0,00475	305,65	1,142	1,0869	2590,1	206,62	2383480	0,01863331
3	322,5	600	7	0,00475	304,65	1,146	1,0869	2590,1	206,62	2383480	0,01840316

Tabel A.11 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis pada *Single row blade* Sudut Inliknasi 20°

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	As (m ²)	mdot udara (kg/s)	$\Delta\omega$ (g/kg)	nA (kg/s)	n (biji)	ρ_{As} (kg/m ³)	$\rho_{A\infty}$ (kg/m ³)	hm (m/s)
1	322,5	200	7	0,17492901	0,12	3,98	0,000478	2469	1,132	1,0869	0,060537702
2	322,5	400	7	0,34985802	0,12	5,56	0,000667	4938	1,142	1,0869	0,034610877
3	322,5	600	7	0,52478704	0,12	5,75	0,000690	7407	1,146	1,0869	0,022247361

Tabel A.12 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Aktual pada *Single row blade* Sudut Inliknasi 20°

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	D (m)	ρ (kg/m ³)	miu (N.s/m ²)	v (m ² /s)	Re	Pr	Nud	k (W/m.K)	h (W/m ² .K)
1	322,5	200	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1,7757E-05	1872,505	0,73	25,085	0,0275	145,22895
2	322,5	400	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1,7757E-05	1872,505	0,73	25,085	0,0275	145,22895
3	322,5	600	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1,7757E-05	1872,505	0,73	25,085	0,0275	145,22895

Tabel A.13 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis pada *Single row blade* Sudut Inliknasi 20°

No	T_{∞} (°K)	Massa (Kg)	Kecepatan (m/s)	D (m)	ρ (kg/m ³)	μ (N.s/m ²)	q	mair (kg)	k (W/m.K)	h (W/m ² .K)
1	322,5	200	7	0,00475	1,0994	0,000019522	345,504686	0,054	0,0275	478,492437
2	322,5	400	7	0,00475	1,0994	0,000019522	856,1402882	0,112	0,0275	269,758914
3	322,5	600	7	0,00475	1,0994	0,000019522	1360,424701	0,174	0,0275	175,565543

Tabel A.13 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Aktual pada *Single row blade* Sudut Inliknasi 20°

BIOGRAFI PENULIS



Febriani Sekar Hadiastuti lahir di Kota Kediri, tanggal 1 Februari 2000. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD 1 Tanjunganom, SMP 1 Tanjunganom, SMA 1 Tanjunganom. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP 02111840000054.

Penulis aktif berorganisasi sebagai staf *human resource development* (HRD) Mesin Music Club pada tahun 2019-2020. Selanjutnya, penulis menjabat sebagai sekretaris dan bendahara umum Mesin Music Club pada tahun 2021-2022. Penulis tercatat sebagai koordinator dan asisten praktikum mata kuliah Perpindahan Panas pada tahun 2021 dan asisten dosen Perencanaan Elemen Mesin. Penulis tergabung dalam anggota laboratorium Rekayasa Thermal dan Sistem Energi sejak tahun 2021. Penulis telah lulus dalam kegiatan pelatihan di ITS yaitu PKTI TD tahun 2018, LKMM Pra TD tahun 2019, LKMW TD tahun 2019, dan LKMW TL tahun 2020. Penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan tingkat institut pada tahun 2019 hingga tahun 2020.

Apabila terdapat saran dan masukan untuk penulis terkait Tugas Akhir ini, silahkan menghubungi penulis melalui email: febrianisekar14@gmail.com.