

TUGAS AKHIR - TM 184835

STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA TERHADAP VARIASI JENIS BED DAN KECEPATAN UDARA PENGERING

NADIA RIZQI ANDINI

NRP 02111840000185

Dosen Pembimbing

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

NIP 196505051990031005

Program Studi Sarjana Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA
TERHADAP VARIASI JENIS BED DAN KECEPATAN UDARA PENGERING**

NADIA RIZQI ANDINI

NRP 02111840000185

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 - TM184835

**EXPERIMENTAL STUDY OF COAL DRYING CHARACTERISTICS ON BED
TYPES AND DRYING AIR SPEED VARIATIONS**

NADIA RIZQI ANDINI

NRP 02111840000185

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 KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA TERHADAP VARIASI JENIS BED DAN KECEPATAN UDARA PENGERING

TUGAS AKHIR

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

Oleh : **NADIA RIZQI ANDINI**
NRP. 0211184000185

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Eng 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 OF COAL DRYING CHARACTERISTICS ON BED TYPES AND DRYING AIR SPEED VARIATIONS

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 : **NADIA RIZQI ANDINI**

NRP. 02111840000185

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 : Nadia Rizqi Andini / 02111840000185

Departemen : S-1 Teknik Mesin

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

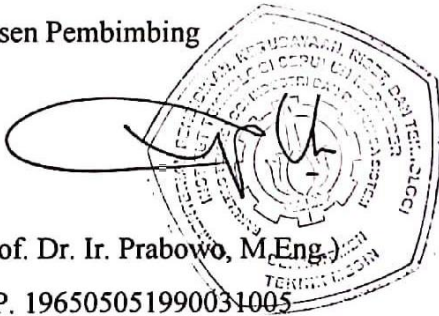
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Eksperimen Karakteristik Pengeringan Batubara terhadap Variasi Jenis Bed dan Kecepatan Udara Pengering” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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. Ir. Prabowo, M.Eng.)

NIP. 196505051990031005

Mahasiswa,



(Nadia Rizqi Andini)

NRP. 02111840000185

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Nadia Rizqi Andini / 02111840000185
Department : Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Prof. Dr. 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.

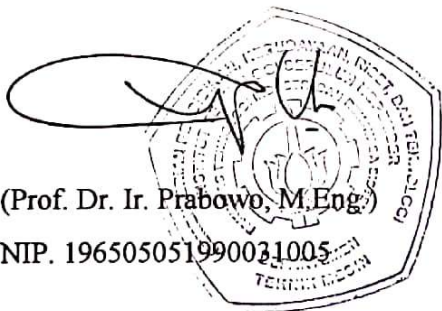
Surabaya, 29 Juli 2022

Acknowledged

Advisor

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

NIP. 196505051990031005



Student

(Nadia Rizqi Andini)

NRP. 02111840000185

STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA TERHADAP VARIASI JENIS BED DAN KECEPATAN UDARA PENGERING

Nama Mahasiswa / NRP : Nadia Rizqi Andini / 0211184000185
Departemen : Teknik Mesin FTIRS – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng Ir. Prabowo, M.Eng

Abstrak

Pembangkitan listrik di Indonesia sebagian besar dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara yaitu sebesar 56,4%. Dari beberapa jenis batubara, menurut kementerian ESDM kualitas batubara di Indonesia masih didominasi oleh batubara dengan kalori rendah dengan kadar air yang cukup tinggi. Batubara ini membuat *pulverizer* bekerja lebih maksimal untuk memenuhi kapasitas dari boiler. Hal ini dapat membuat *pulverizer* lebih mudah rusak. Permasalahan ini dapat ditangani dengan meningkatkan kualitas batubara melalui pengurangan nilai *moisture content* menggunakan alat eksperimen bernama *fluidized bed drying*. *Fluidized bed drying* merupakan serangkaian alat yang terdiri dari *drum*, pompa, *heater*, *compact heat exchanger*, *voltage regulator*, sentrifugal *blower*, *drying chamber*, dan *drying bed*. Pada eksperimen ini, akan diamati pengaruh variasi kecepatan udara pengeringan sebesar 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s serta variasi *drying bed* yaitu *perforated plate* berdiameter 5 mm dan *single row blade* dengan sudut 20° terhadap *drying rate* batubara. Massa pengeringan batubara yang digunakan adalah 400 gram batubara tiap variasi eksperimen dengan asumsi bentuk granular berdiameter ± 4,75 mm. Pengambilan sampel batubara dilakukan tiap 1 menit hingga menit ke-5. Kemudian dilakukan pengeringan lebih lanjut menggunakan oven pada temperatur 105°C 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 kecepatan 9m/s. Hal ini dikarenakan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s memiliki nilai bilangan *Reynold* yang paling besar sehingga air yang dapat dipindahkan dari batubara ke udara pengering semakin banyak. Selanjutnya penggunaan *single row blade* dengan sudut 20° membuat arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *reynold number*nya 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. Pada menit pertama dengan nilai temperatur dan *relative humidity* inlet berturut-turut sebesar 49,5°C dan 16%, didapatkan nilai temperatur dan *relative humidity* outlet berturut-turut sebesar 31,7°C dan 59,8% dengan penurunan nilai *moisture content* dari 34% hingga menjadi 1%. *Drying rate* terbesar terjadi pada menit pertama proses pengeringan yaitu sebesar 53 gr/menit. Total massa air yang dapat dilepaskan batubara sebesar 127,7448 gram dengan nilai koefisien perpindahan massa aktual sebesar 0,045 m/s dan koefisien perpindahan panas aktual yang dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa aktual sebesar 322,33 W/m² .K.

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

EXPERIMENTAL STUDY OF COAL DRYING CHARACTERISTICS ON BED TYPES AND DRYING SPEED VARIATIONS

Student Name / NRP : Nadia Rizqi Andini / 02111840000185
Departement : Mechanical Engineering FTIRS – ITS
Advisor : Prof. Dr. Eng Ir. Prabowo, M.Eng

Abstract

Around 56.4% of the electricity generation in Indonesia is generated from coal-fired power plants. From several types of coal, according to the Ministry of Energy and Mineral Resources, the quality of coal in Indonesia is still dominated by low-calorie coal with high water content. This type of coal makes the pulverizer works more to fulfill the capacity of the boiler thus it will be easier to be broken. This problem can be solved by improving the coal quality by reducing the moisture content using an experimental tool called fluidized bed drying. Fluidized bed drying is a series of equipment consisting of a drum, pump, heater, compact heat exchanger, voltage regulator, centrifugal blower, drying chamber, and drying bed. In this experiment, we will observe the effect of variations in drying air velocities of 5 m/s, 7 m/s, and 9 m/s as well as variations in drying beds, namely perforated plate with a diameter of 5 mm and single row blade with an angle of 20° on the drying rate of coal. The drying mass of coal used is 400 grams of coal 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. Further drying was carried out using an oven at a temperature of 105°C for 180 minutes to obtain the moisture content of the coal.

From the experiment 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 speed of 9 m/s. This is because the drying air velocity of 9 m/s has the greatest Reynolds number so that more water can be transferred from coal to drying air. 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. In the first minute with 49.5°C inlet temperature and 16% inlet relative humidity inlet, we got 31.7°C outlet temperature and 59.8% outlet relative humidity, with a decrease in moisture content from 34% to 1%. The largest drying rate occurs in the first minute of the drying process, which is 53 gr/minute. The total mass of water that can be released by coal is 127.7448 grams with the actual mass transfer coefficient value of 0.045 m/s and the actual heat transfer coefficient influenced by the actual mass transfer coefficient of 322.33 W/m² .K

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul : “**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK PENDINGINAN BATUBARA TERHADAP VARIASI JENIS BED DAN KECEPATAN UDARA PENDINGIN**” 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, Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T., dan Bapak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu dan saran untuk menyempurnakan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Vivien Suphandani, ST., M.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, Papa Bambang Irianto, Mama Suryati, atas dukungan materil dan moril yang telah diberikan kepada penulis selama penulisan Tugas Akhir ini.
6. Kakak penulis, Gilang Abimantrana dan Satya Jalu Sepasthika atas motivasi untuk segera menyelesaikan studi penulis secara tepat waktu.
7. Sidi Budisina Baharuddin, atas segala motivasi, dukungan, opini dan waktu yang diluahkan untuk mendengarkan keluh kesah penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Febriani Sekar Hadiastuti, atas segala bantuan, canda tawa, dan semua waktu yang diluahkan untuk bertukar opini selama menjadi *partner* eksperimen Tugas Akhir ini hingga penulisan Tugas Akhir terselesaikan dengan baik.
9. Semua anggota Cilok Ent. atas dukungan dan waktu yang diluahkan untuk mendengarkan keluh kesah penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
10. Lusy dan Nadine atas waktu yang diluahkan untuk menemani penulis mengerjakan Tugas Akhir ini.
11. Mas Yudha, Mas Ihsan, dan Mas Farras atas waktu yang diluahkan untuk menemani dan mendengarkan keluh kesah penulis selama mengerjakan Tugas Akhir ini.
12. Semua anak bimbingan Pak Prabowo yang telah memberi motivasi dan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
13. 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.

14. Saya sendiri yang sudah berhasil berjuang hingga akhir dalam menyelesaikan studi dan Tugas Akhir saya di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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

Abstrak	viii
Abstract.....	ix
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL	xx
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II	4
TINJAUAN PUSTAKA	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 The Effect of Distributor Design on Hydrodynamics of Conical Fluidized Bed Dryer 5	
2.1.3 Studi Eksperimen Pengaruh Sudut <i>Blade</i> Tipe <i>Single Row Distributor</i> pada <i>Swirling Fluidized Bed Coal Dryer</i> terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara.....	6
2.1.4 Studi Eksperimen Pengaruh Kecepatan Fluidisasi dan Jenis <i>Bed</i> Pengeringan terhadap Unjuk Kerja <i>Swirling Fluidized Bed Coal Dryer</i> Tanpa Pengarah Aliran Berbentuk <i>Cone</i>	8
2.1.5 Studi Eksperimen Pengaruh Diameter Perforated Plate (5 Mm Dan 10 Mm) dan Kecepatan Udara dibawah Fluidisasi terhadap Kinerja Coal Dryer	9
2.2 Konsep Dasar	12
2.2.1 Batubara.....	12
2.2.2 Pengeringan	13
2.2.3 Perpindahan Panas dan Massa.....	14
2.2.4 Psychrometric Chart	17
2.2.5 Fluidized Bed.....	19

BAB III.....	22
METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Metode Eksperimen	22
3.1.1 Posisi Pengukuran dan Pengambilan Data	23
3.1.2 Variabel Penelitian	25
3.2 Peralatan Penunjang Eksperimen.....	26
3.3 Urutan Pelaksanaan Penelitian.....	27
3.3.1 Studi Literatur.....	27
3.3.2 Persiapan Alat.....	27
3.3.3 Pengambilan Data.....	28
3.3.4 Analisis Data	28
3.3.5 Lembar Pengambilan Data	29
3.3.6 Flowchart Penelitian.....	30
3.3.7 Flowchart Eksperimen.....	31
3.3.8 Jadwal Kegiatan.....	33
BAB IV.....	34
HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Hasil Penelitian	34
4.1.1 Contoh Perhitungan <i>Flow Open Area Bed</i> Pengeringan	34
4.1.2 Contoh Perhitungan Kecepatan Minimum Fluidisasi Batubara	35
4.1.3 Contoh Perhitungan <i>Mass Flow Rate</i> Udara Pengering	36
4.1.4 Contoh Perhitungan Massa Uap Air dan <i>Drying rate</i> Sisi Udara	37
4.1.5 Contoh Perhitungan <i>Moisture Content</i> dan <i>Drying rate</i> Sisi Batubara.....	37
4.1.6 Contoh Perhitungan Nilai Efektivitas Eksperimen.....	38
4.1.7 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas	38
4.1.8 Contoh Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa Teoritis.....	38
4.1.9 Contoh Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa Aktual Hasil Penelitian 39	
4.1.10 Contoh Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Panas Aktual Hasil Penelitian 39	
4.2 Pembahasan	40
4.2.1 Analisa Grafik Temperatur Udara Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengering ..	41
4.2.2 Analisa Grafik <i>Relative Humidity</i> Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengering ...	44
4.2.3 Analisa Grafik <i>Psychrometric</i> Udara Pengering	47
4.2.4 Analisa Grafik <i>Moisture Content</i> Fungsi Waktu Sisi Batubara	56

4.2.5	Analisa Grafik <i>Drying Rate</i> Fungsi Waktu <i>Perforated Plate</i> dan <i>Single Row Blade Sisi Batubara</i>	59
4.2.6	Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap Efektivitas Pengeringan 62	
4.2.7	Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap <i>Heat Transfer Coefficient</i> pada <i>Perforated Plate</i> dan <i>Single Row Blade</i>	65
4.2.8	Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap <i>Mass Transfer Coefficient</i> pada <i>Perforated Plate</i> dan <i>Single Row Blade</i>	65
4.2.9	Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap Perpindahan Air Total dari Sisi Udara Pengering Dan Batubara pada <i>Perforated Plate</i> Dan <i>Single Row Blade</i> .	70
BAB V		72
KESIMPULAN DAN SARAN		72
5.1	Kesimpulan	72
5.2	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA.....		74
LAMPIRAN		76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perbandingan Batubara Lignit dan PRB.....	4
Gambar 2. 2 Efek Coal Moisture Content pada Rasio antara Massa Flue Gas dan Coal Flow Rates dan terhadap Efisiensi Boiler.....	4
Gambar 2. 3 Pengaruh Coal Moisture terhadap Net Unit Heat Rate.....	5
Gambar 2. 4 Jenis Plat Distributor	5
Gambar 2. 5 Perbandingan Moisture Content pada Kecepatan 1,5 m/s.....	6
Gambar 2. 6 Profil Single Row Blade	6
Gambar 2. 7 Grafik Relative Humidity dan Temperature Udara Keluar Chamber terhadap Waktu	7
Gambar 2. 8 Grafik Moisture Content dan Selisih Humidity Ratio terhadap Waktu.....	7
Gambar 2. 9 Grafik Koefisien Perpindahan Massa terhadap Sudut Blade.....	7
Gambar 2. 10 Drying Chamber dan Bed Pengeringan	8
Gambar 2. 11 Moisture Content Batubara terhadap Drying Time	8
Gambar 2. 12 Drying Rate Batubara terhadap Drying Time.....	9
Gambar 2. 13 Massa Total Air yang Berpindah terhadap Variasi Kecepatan Udara Pengering	9
Gambar 2. 14 Profil Perfiorated Plate	10
Gambar 2. 15 Diagram Psikrometrik Udara Pengering.....	10
Gambar 2. 16 Diagram Drying Rate dan Moisture Content Batubara terhadap Waktu Pengeringan	10
Gambar 2. 17 Diagram Psikrometrik Udara Pengering.....	11
Gambar 2. 18 Diagram Drying Rate dan Moisture Content Batubara terhadap Waktu Pengeringan	11
Gambar 2. 19 Perbandingan Koefisien Perpindahan Panas terhadap Kecepatan Fluidisasi	11
Gambar 2. 20 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa terhadap Kecepatan Fluidisasi ...	12
Gambar 2. 21 Perubahan Laju Pengeringan terhadap Waktu.....	13
Gambar 2. 22 Psychrometric Chart dan Variabelnya.....	17
Gambar 2. 23 Proses pada Psychrometrics Chart.....	19
Gambar 2. 24 Drying Chamber	19
Gambar 2. 25 Perforated Plate.....	19
Gambar 2. 26 Single Row Blade	20
Gambar 2. 27 Penggunaan Drying Bed Perforated Plate	20
Gambar 2. 28 Penggunaan Drying Bed Single Row Blade.....	20

Gambar 2. 29 Skema Aliran Udara Pengering	21
Gambar 3. 1 Instalasi Alat Eksperimen	22
Gambar 3. 2 Perforated Plate.....	23
Gambar 3. 3 Single Row Blade	23
Gambar 3. 4 Posisi Pengukuran Kecepatan Udara Pengering.....	24
Gambar 3. 5 Posisi Pengambilan Data Menggunakan RH Meter	24
Gambar 3. 6 Posisi Pengambilan Nilai Temperatur dan Relative Humidity Inlet Fan Radiator, dan Nilai Temperatur Air pada Drum.....	24
Gambar 4. 1 Desain Bed Perforated Plate	34
Gambar 4. 2 Desain Bed Single Row Blade.....	35
Gambar 4. 3 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time Perforated Plate	41
Gambar 4. 4 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time Single Row Blade	41
Gambar 4. 5 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade.....	42
Gambar 4. 6 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade Kecepatan 9m/s	43
Gambar 4. 7 Grafik RH Outlet vs Drying Time Perforated Plate	44
Gambar 4. 8 Grafik RH Outlet vs Drying Time Single Row Blade.....	44
Gambar 4. 9 Grafik RH Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade.....	45
Gambar 4. 10 Grafik RH Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade Kecepatan 9m/s.....	46
Gambar 4. 11 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate Kecepatan 5m/s	47
Gambar 4. 12 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate Kecepatan 7m/s	48
Gambar 4. 13 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate Kecepatan 9m/s	49
Gambar 4. 14 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s	50

Gambar 4. 15 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Kecepatan 5m/s	50
Gambar 4. 16 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Kecepatan 7m/s	51
Gambar 4. 17 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Kecepatan 9m/s	53
Gambar 4. 18 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Sudut 20° pada Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s.....	54
Gambar 4. 19 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate vs Single Row Blade dengan Sudut 20°	55
Gambar 4. 20 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate vs Single Row Blade dengan Sudut 20° Kecepatan 9m/s	55
Gambar 4. 21 Grafik Moisture Content Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s.....	56
Gambar 4. 22 Grafik Moisture Content Single Row Blade dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s.....	57
Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan Moisture Content Perforated Plate Diameter 5mm vs Single Row Blade dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s.....	58
Gambar 4. 24 Grafik Drying Rate Perforated Plate dengan Diameter 5mm Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s.....	59
Gambar 4. 25 Grafik Drying Rate Single Row Blade dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s.....	60
Gambar 4. 26 Grafik Perbandingan Drying Rate Perforated Plate dengan Diameter 5mm vs Single Row Blade dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s.....	61
Gambar 4. 27 Grafik Efektivitas Pengeringan dengan Perforated Plate	62
Gambar 4. 28 Grafik Efektivitas Pengeringan dengan Single Row Blade	62
Gambar 4. 29 Grafik Perbandingan Efektivitas Pengeringan dengan Kecepatan Udara Pengering 5m/s	63
Gambar 4. 30 Grafik Perbandingan Efektivitas Pengeringan dengan Kecepatan Udara Pengering 7m/s	64
Gambar 4. 31 Grafik Perbandingan Efektivitas Pengeringan dengan Kecepatan Udara Pengering 9m/s	64

Gambar 4. 32 Grafik heat transfer coefficient fungsi kecepatan udara pengering pada perforated plate diameter 5 mm dan single row blade sudut 20°	65
Gambar 4. 33 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis Batubara fungsi kecepatan udara pengering pada perforated plate diameter 5 mm dan single row blade sudut 20°	66
Gambar 4. 34 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Aktual Batubara fungsi kecepatan udara pengering pada perforated plate diameter 5 mm dan single row blade sudut 20°	67
Gambar 4. 35 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis dan Aktual Batubara Plate vs Blade	68
Gambar 4. 36 Perbandingan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis dan Aktual Fungsi Kecepatan Udara Pengering Penggunaan Bed Jenis Perforated Plate Diameter 5mm dan Single Row Blade Sudut 20°	69
Gambar 4. 37 Perpindahan Air Total dari Sisi Udara Pengering Dan Batubara pada Perforated Plate Dan Single Row Blade	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Jumlah Sumberdaya dan Cadangan Batubara yang Terverifikasi di Indonesia (ESDM, 2021)	1
Tabel 3. 1 Lembar Pengambilan Data	29
Tabel 3. 2 Jadwal Kegiatan.....	33
Tabel 4. 1 Properti Udara Pengering Pada Menit Pertama Bed Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 7m/s.....	37
Tabel 4. 2 Properti Massa Batubara Pada Menit Pertama Bed Perforated Plate dengan Diameter 5mm Kecepatan 7m/s	37

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
n_A''	= <i>Mass flux</i>	$kg/s.m^2$
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
\forall	= 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>

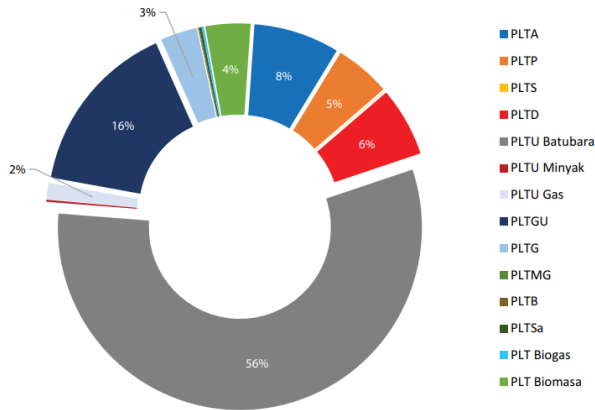
in = Inlet
out = Outlet
S = Permukaan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkitan listrik di Indonesia sebagian besar dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara yaitu sebesar 56,4% (Suharyati, 2019).

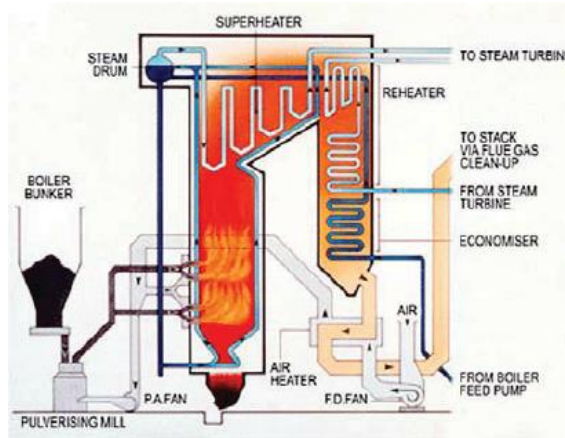


Gambar 1. 1 *Produksi Listrik per Jenis Energi Tahun 2018*

Batubara sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap memiliki 4 jenis yaitu batubara antrasit, bituminus, subbituminus, dan lignit. Tiap batubara memiliki kadar air yang berbeda. Menurut data Kementerian ESDM, jenis batubara dengan kadar air tertinggi adalah subbituminus dan lignit yaitu sebesar 10-45% dan 30-60%. Kualitas batubara di Indonesia masih didominasi oleh batubara dengan kalori rendah dan sedang dengan kadar air yang cukup tinggi (ESDM B. G., 2021). Batubara dengan kalori rendah Indonesia pada umumnya mengandung kadar air sekitar 20% hingga 40% (ESDM, 2008).

Tabel 1. 1 *Jumlah Sumber Daya dan Cadangan Batubara yang Terverifikasi di Indonesia (ESDM B. G., 2021)*

Sumberdaya Batubara terverifikasi		Cadangan Batubara terverifikasi	
kalori rendah	28.723,07	kalori rendah	9.850,85
kalori sedang	54.073	kalori sedang	14.011,87
kalori tinggi	11.794,97	kalori tinggi	1.821,56
kalori sangat tinggi	2.496,13	kalori sangat tinggi	576,61



Gambar 1. 2 Pembangkit Listrik Tenaga Fosil Advanced Ultra-supercritical (Peng Jia, 2013) (Harekrushna Sutar, 2012)

Apabila batubara yang digunakan berada di bawah spesifikasi *boiler*, maka salah satu komponen pembangkit yaitu *pulverizer* akan beroperasi lebih berat untuk memenuhi kapasitas dari boiler. Kerja berat dari *pulverizer* ini akan membuat komponen tersebut rentan mengalami kerusakan dan berpengaruh pada suplai batubara ke *boiler*. Hal ini tentunya akan mempengaruhi performa dari *boiler*. Maka dari itu, penting dilakukan proses peningkatan kualitas batubara dengan mengurangi kadar air dari batubara menggunakan alat *swirling fluidized bed* sehingga *heating valuenya* akan meningkat.

1.2 Perumusan Masalah

Batubara merupakan bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap terdapat komponen berupa *boiler* yang berfungsi merubah energi fosil berupa batubara menjadi energi *thermal*. Batubara sebagai energi fosil yang dirubah pada *boiler* sebaiknya memiliki kualitas yang baik agar *performance* dari *boiler* akan baik pula. Peningkatan kualitas batubara dapat dilakukan dengan mengurangi kadar air dari batubara tersebut. *Swirling Fluidized Bed* merupakan salah satu teknologi untuk mengurangi kadar air dari batubara sehingga kualitas dari batubara akan bertambah. Beberapa faktor yang memengaruhi kinerja dari *Swirling Fluidized Bed* adalah beban pengeringan, kecepatan *inlet* udara pengering, *temperature* pengeringan, dan jenis *bed* yang digunakan.

Dalam penelitian ini akan dilihat pengaruh penggunaan bed pengeringan berupa *blade* tipe *single row* dengan sudut 20 derajat terhadap *drying rate* batubara pada kecepatan 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s, pengaruh penggunaan bed pengeringan berupa *perforated plate* dengan lubang diameter 5 mm pada kecepatan 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s, proses perpindahan panas dan massa pada batubara selama pengeringan, dan kondisi udara pengering pada diagram psikrometrik selama proses pengeringan. Pengaruh parameter – parameter tersebut perlu diteliti lebih lanjut untuk mengetahui variasi *bed* manakah yang memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap *drying rate* dari batubara.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan udara dibawah kecepatan minimum fluidisasi.
2. Beban pengeringan batubara untuk masing-masing variasi sebesar 400 gram.
3. Batubara yang digunakan berbentuk granula dengan diameter $\pm 4,75$ mm.
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 temperatur ruangan (25°C).
8. Alat ukur yang digunakan telah terkalibrasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan diatas, maka tujuan dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh sudut 20 derajat pada *blade* tipe *single row* terhadap *drying rate* batubara pada kecepatan 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s.
2. Mengetahui pengaruh lubang diameter 5 mm pada plate berbentuk *perforated* terhadap *drying rate* batubara pada kecepatan 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s.
3. Mengetahui proses perpindahan panas dan massa pada batubara selama pengeringan.
4. Mengetahui kondisi udara pengering pada diagram psikrometrik selama proses pengeringan.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah diuraikan diatas, maka manfaat dilaksanakannya penelitian ini adalah untuk menaikkan kualitas batubara dengan mengurangi *moisture content* batubara tersebut. Selanjutnya, dari penelitian ini akan didapatkan variasi paling optimum untuk mengeringkan batubara pada *fluidized bed coal dryer*. Dilaksanakannya penelitian ini juga sebagai bentuk nyata peristiwa perpindahan panas dan massa yang terjadi pada suatu material. Kemudian, penelitian ini juga menampilkan proses yang dialami udara pengering batubara.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

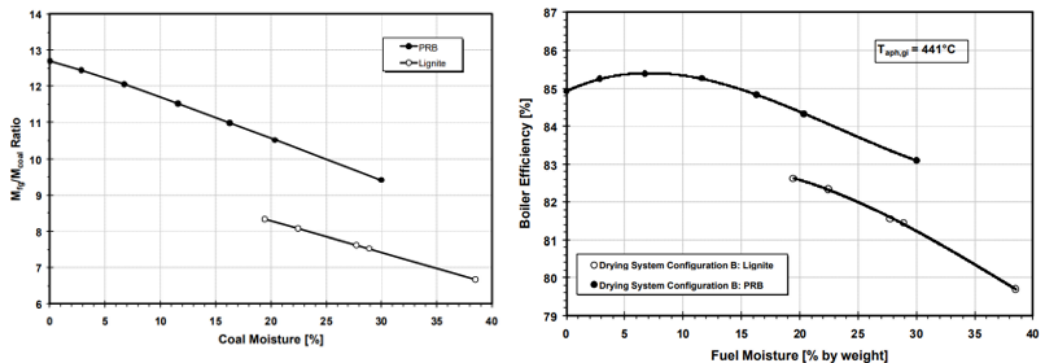
2.1.1 Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants

(Levy, 2005) Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi manfaat dari pengurangan kelembaban bahan bakar menggunakan panas limbah pembangkit listrik, sebelum pembakaran batubara dalam *pulverized coal boiler*. Analisis komparatif dilakukan untuk lignit dan Batubara PRB untuk menentukan bagaimana kinerja unit dengan variasi kelembaban batubara. Hasilnya adalah tingkat kelembaban batubara dan peringkat batubara mempengaruhi parameter seperti efisiensi *boiler*, *station service power* yang dibutuhkan untuk kipas dan *pulverizer* dan *net unit heat rate*.

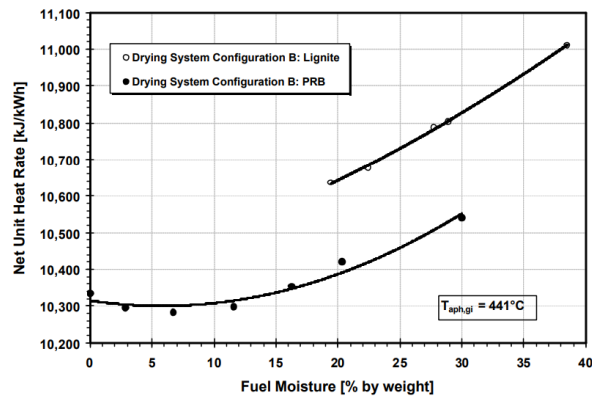
Ultimate Analyses – Comparison of Lignite and PRB Coals

	Units	As-Received		20% Fuel Moisture		MAF	
		Lignite	PRB	Lignite	PRB	Lignite	PRB
Carbon	% wt	34.03	49.22	44.27	56.25	69.17	76.05
Hydrogen	% wt	2.97	3.49	3.87	3.99	6.04	5.39
Sulfur	% wt	0.51	0.35	0.67	0.40	1.04	0.54
Oxygen	% wt	10.97	10.91	14.27	12.47	22.29	16.86
Nitrogen	% wt	0.72	0.75	0.92	0.86	1.46	1.16
Moisture	% wt	38.50	30.00	20.00	20.00	0.00	0.00
Ash	% wt	12.30	5.28	16.00	6.30	0.00	0.00
TOTAL	% wt	100.00	100.00	100.00	100.27	100.00	100.00
HHV	kJ/kg	14,900	19,418	19,383	22,193	30,287	30,003

Gambar 2. 1 Perbandingan Batubara Lignit dan PRB



Gambar 2. 2 Efek Coal Moisture Content pada Rasio antara Massa Flue Gas dan Coal Flow Rates dan terhadap Efisiensi Boiler

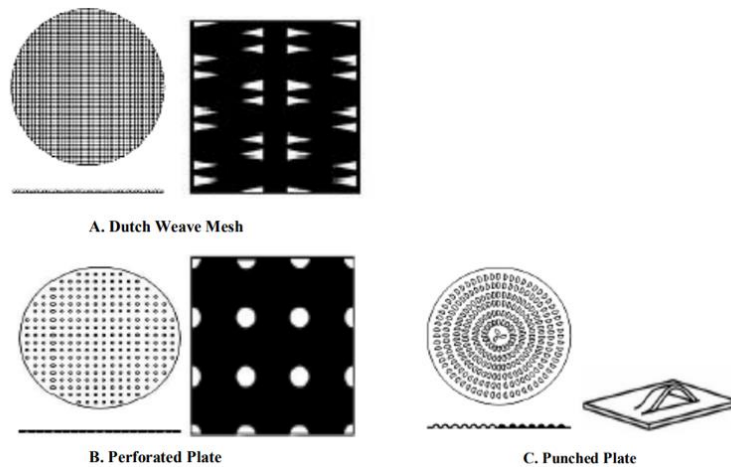


Gambar 2. 3 Pengaruh Coal Moisture terhadap Net Unit Heat Rate

Dilihat dari tabel dan beberapa grafik diatas, dapat kita simpulkan bahwa semakin tinggi *coal moisture*, semakin tinggi pula rasio massa gas buang terhadap laju aliran batubara, efisiensi boiler makin turun, *net unit heat rate* makin tinggi.

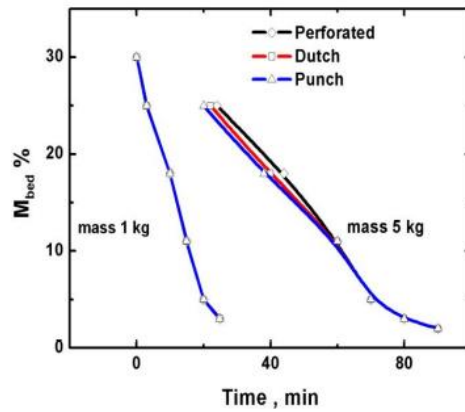
2.1.2 The Effect of Distributor Design on Hydrodynamics of Conical Fluidized Bed Dryer

(Sutar, 2012) Penelitian ini menyajikan studi perbandingan hidrodinamika dari *fluidized bed dryer* berbentuk kerucut. Digunakan tiga jenis plat distributor yaitu *perforated plate*, *punched plate*, dan *dutch weave mesh distributor*.



Gambar 2. 4 Jenis Plat Distributor

Pembebanan plat dilakukan dengan menggunakan 3 variasi yaitu 1, 3 dan 5 kg. Kecepatan pengeringan yang digunakan adalah 1,5 dan 3 m/s.

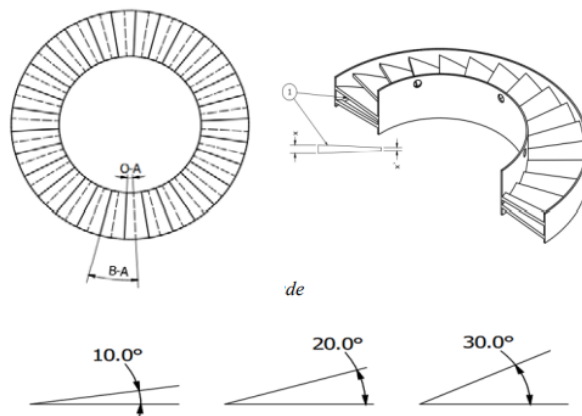


Gambar 2. 5 Perbandingan Moisture Content pada Kecepatan 1,5 m/s

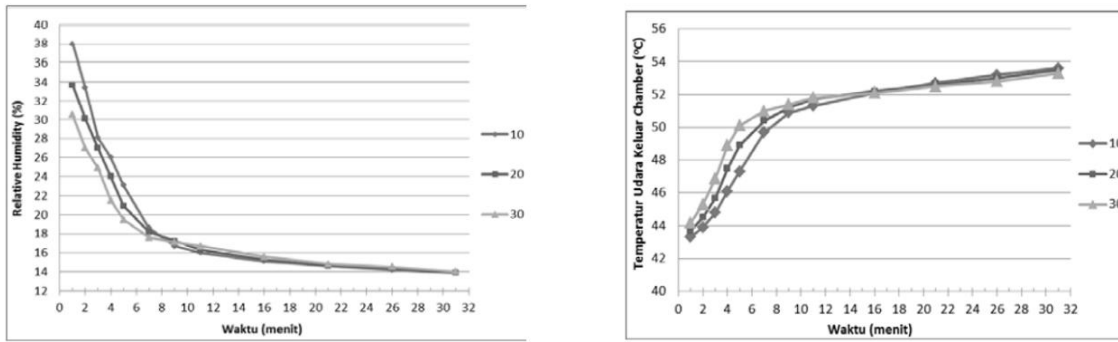
Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis plat distributor berupa *perforated plate* memberikan kinerja yang lebih baik dari yang lain.

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

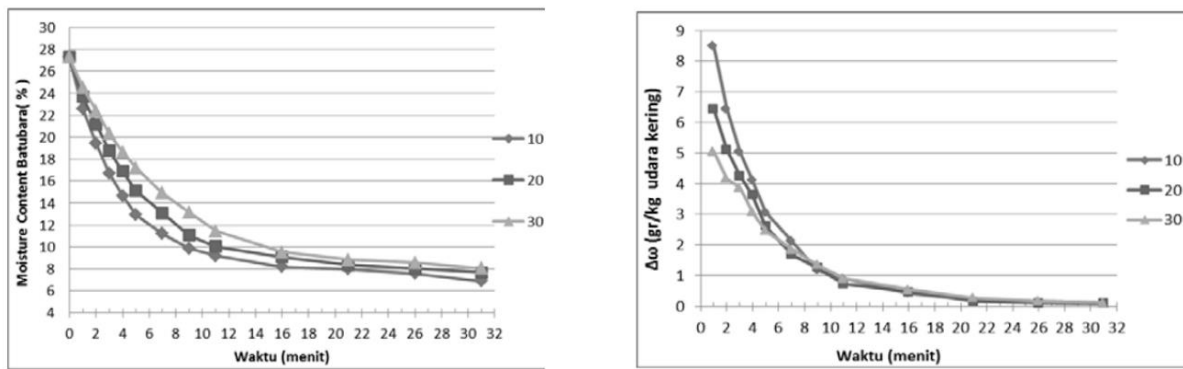
(Tegar, 2014) Studi eksperimen ini menggunakan model skala alat percobaan yaitu *swirling fluidized bed coal dryer*. Udara panas dihembuskan oleh *blower* ke dalam *chamber* melewati *distributor bed* berupa *blade* yang membentuk sudut sehingga menyebabkan *swirling* didalam *chamber*. Udara panas tersebut memiliki *temperature* sebesar 55°C. Total waktu pengeringan sebesar 31 menit dengan menimbang massa sampel batubara basah setiap 1 menit sebanyak 5 kali, 2 menit sebanyak 3 kali, dan 5 menit sebanyak 4 kali. Sudut blade bed distributor yang digunakan 10°, 20°, dan 30° dengan massa batubara 600 gram dan berbentuk granula dengan ukuran 10 mm. Kemudian pengeringan ini dilanjutkan menggunakan oven dengan temperatur 105° C selama 180 menit.



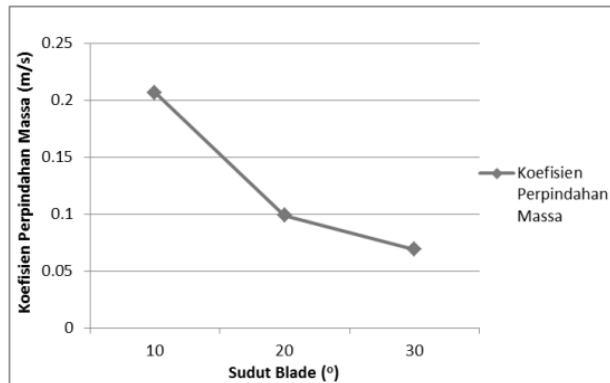
Gambar 2. 6 Profil Single Row Blade



Gambar 2. 7 Grafik Relative Humidity dan Temperature Udara Keluar Chamber terhadap Waktu



Gambar 2. 8 Grafik Moisture Content dan Selisih Humidity Ratio terhadap Waktu

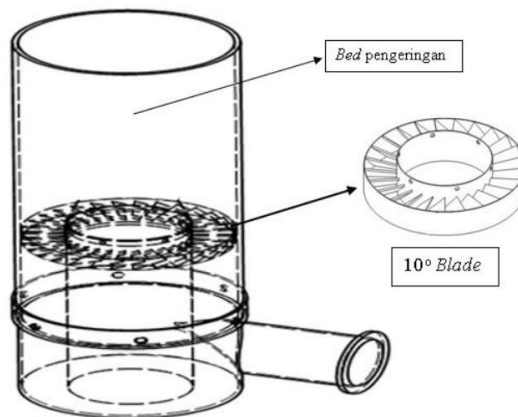


Gambar 2. 9 Grafik Koefisien Perpindahan Massa terhadap Sudut Blade

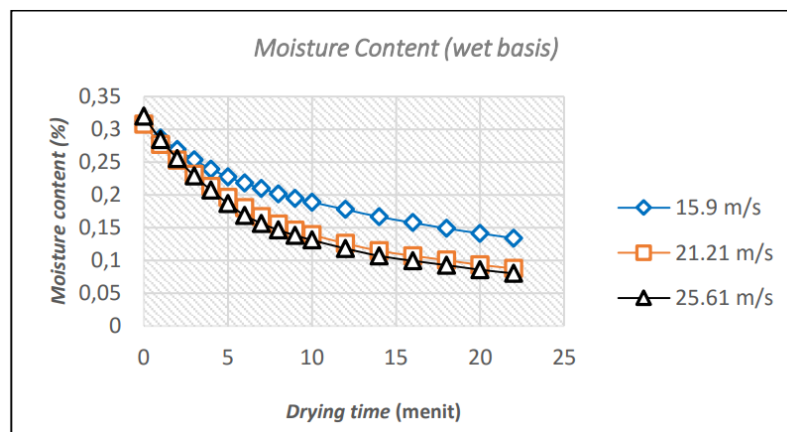
Dari hasil eksperimen diketahui bahwa *temperature* keluar dan penurunan *relative humidity* tertinggi ada di *blade* 10°. Pengurangan *moisture content* tertinggi ada di *blade* 10°. Selain itu, laju pengeringan, kecepatan udara, dan koefisien perpindahan masa tertinggi ada di *blade* 10°.

2.1.4 Studi Eksperimen Pengaruh Kecepatan Fluidisasi dan Jenis *Bed* Pengeringan terhadap Unjuk Kerja *Swirling Fluidized Bed Coal Dryer* Tanpa Pengaruh Aliran Berbentuk *Cone*

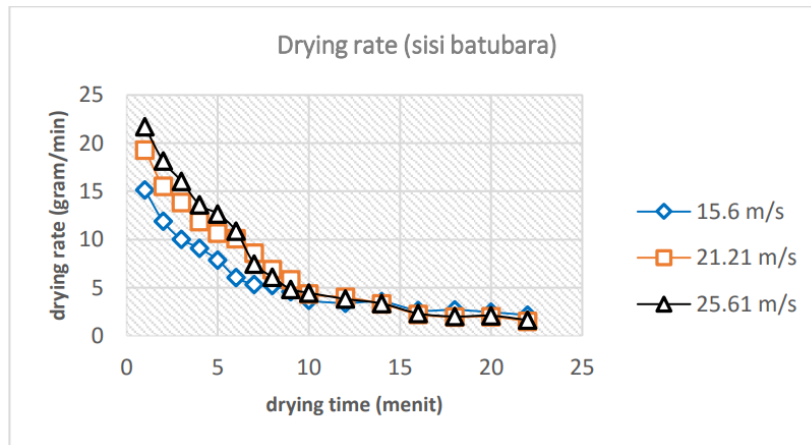
(Ibrahim, 2017) Eksperimen ini dilakukan menggunakan rangkaian alat untuk memfluidisasi suatu benda padat. Rangkaian alat ini didesain untuk mengeringkan batubara dengan udara yang berperan sebagai media pengering. Kecepatan udara pengeringan akan divariasikan pada 75%, 100%, dan 125% dari kecepatan minimum fluidisasi. Batubara yang akan dikeringkan berbentuk granular dengan diameter rata-rata sebesar ± 6 mm. Beban pengeringan di setiap variasi kecepatan adalah 600 gram. Untuk mendapatkan aliran swirl, udara di hembuskan oleh sentrifugal blower menuju vane pengarah aliran dengan sudut 10° . Pengeringan dilakukan selama 22 menit. Pada setiap menit pengeringan, dicatat temperatur dan relative humidity dari udara pengering. Diambil pula sampel batubara sebanyak ± 3 gram untuk menghitung moisture content batubara.



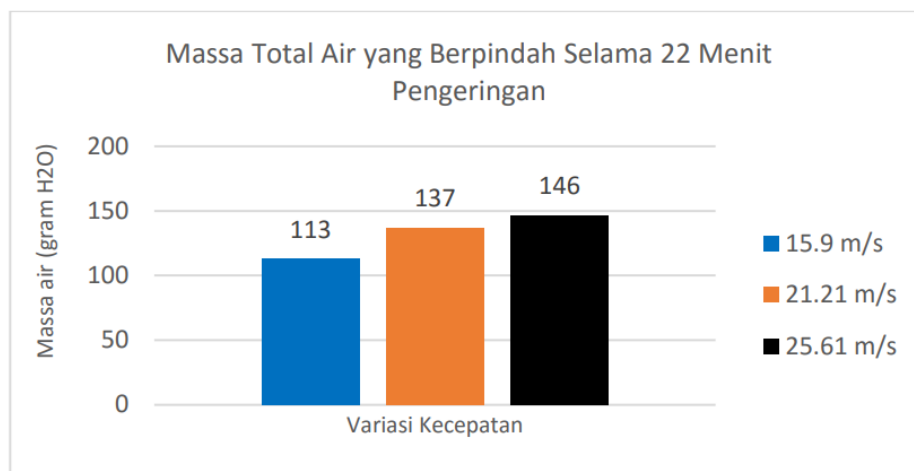
Gambar 2. 10 Drying Chamber dan Bed Pengeringan



Gambar 2. 11 Moisture Content Batubara terhadap Drying Time



Gambar 2.12 Drying Rate Batubara terhadap Drying Time

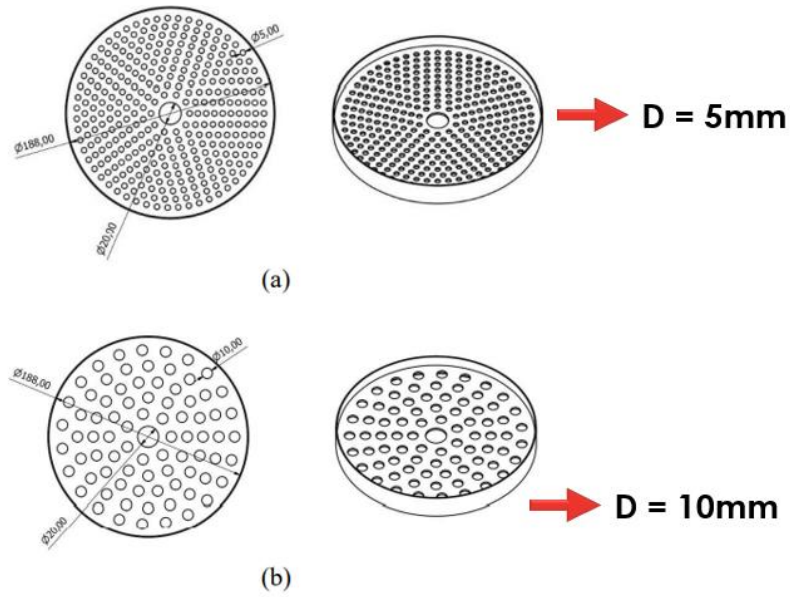


Gambar 2.13 Massa Total Air yang Berpindah terhadap Variasi Kecepatan Udara Pengering

Dari hasil eksperimen diketahui bahwa massa total air yang berpindah selama pengeringan paling besar etika digunakan kecepatan udara paling besar yaitu 25,61m/s. Selisih *drying rate* dan pengurangan *moisture content* saat penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 21,21m/s dan 25,61m/s hanya sedikit.

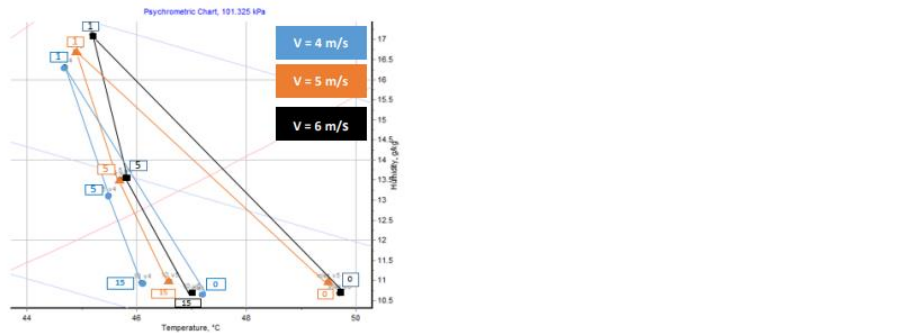
2.1.5 Studi Eksperimen Pengaruh Diameter *Perforated Plate* (5 Mm Dan 10 Mm) dan Kecepatan Udara dibawah Fluidisasi terhadap Kinerja *Coal Dryer*

(Widarwis, 2018) Eksperimen ini dilakukan menggunakan alat pengering batubara dengan udara sebagai media pengering. Plat distributor yang digunakan adalah *perforated plate* dengan diameter 5 mm dan 10 mm di dalam *drying chamber* pada *bed coal dryer*. Variasi kecepatan udara pengering yang digunakan adalah 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Beban pengeringan pada tiap variasi sebesar 300 gram. Batubara yang digunakan berbentuk granular dengan diameter $\pm 6,5$ mm. Pengambilan sampel batubara dilakukan tiap 1 menit hingga menit ke-5 kemudian dilanjutkan hingga menit ke-15 dengan interval 2 menit. *Moisture content* didapatkan dengan melakukan pengeringan batubara menggunakan oven pada temperatur 105°C selama 180 menit.

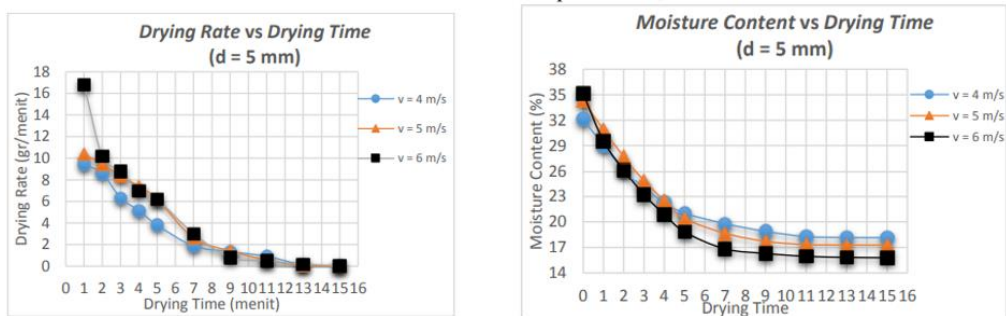


Gambar 2. 14 Profil Perforated Plate

1. Hasil Eksperimen pada *Perforated Plate* berdiameter lubang 5 mm

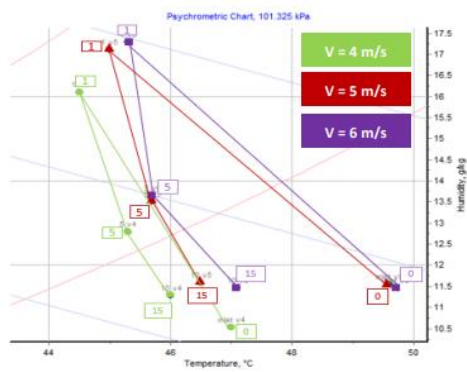


Gambar 2. 15 Diagram Psikrometrik Udara Pengering

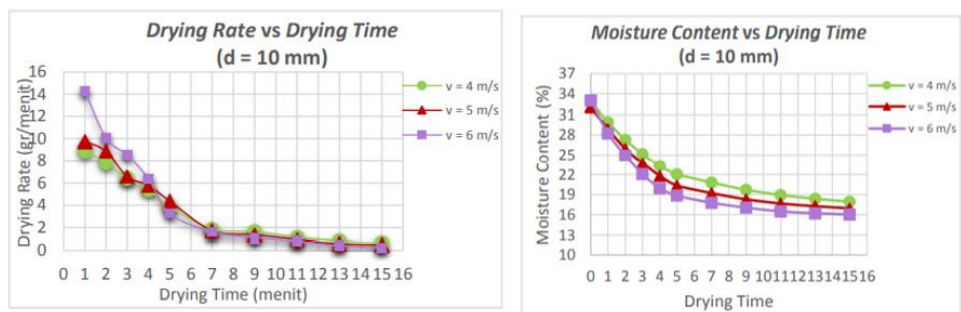


Gambar 2. 16 Diagram Drying Rate dan Moisture Content Batubara terhadap Waktu Pengeringan

2. Hasil Eksperimen pada *Perforated Plate* berdiameter lubang 10 mm

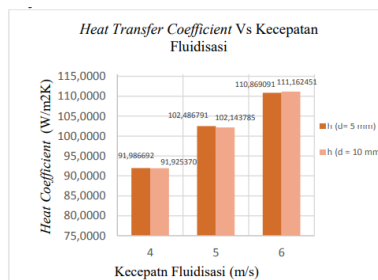


Gambar 2. 17 Diagram Psikrometrik Udara Pengering

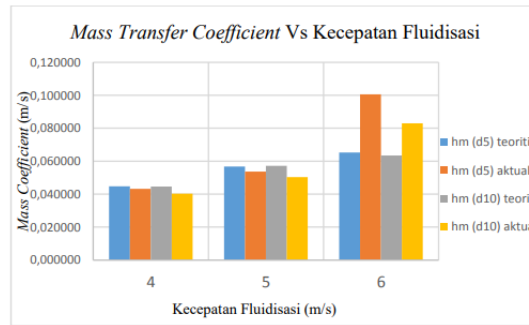


Gambar 2. 18 Diagram Drying Rate dan Moisture Content Batubara terhadap Waktu Pengeringan

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan, proses pengeringan yang paling cepat pada menit ke 1 hingga 7 yaitu pada kecepatan 6 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm karena *perforated plate* diameter 5 mm memiliki lebih banyak lubang dibandingkan dengan *perforated plate* diameter 10 mm. *Moisture content* mengalami penurunan hingga 15,78% pada menit ke-15 dengan nilai *drying rate* rata-rata sebesar 5,3 gr/menit.



Gambar 2. 19 Perbandingan Koefisien Perpindahan Panas terhadap Kecepatan Fluidisasi



Gambar 2. 20 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa terhadap Kecepatan Fluidisasi

Total massa air yang dapat dilepaskan batubara sebesar 58,0121 gram dengan nilai koefisien perpindahan massa 0,06 m/s dan koefisien perpindahan panas sebesar 102,48 W/m².K.

2.2 Konsep Dasar

2.2.1 Batubara

Menurut Achmad Prijono (1992), batubara adalah bentuk bahan bakar hydro karbon padat yang biasanya terbentuk dari tumbuh-tumbuhan dalam lingkungan bebas oksigen dan terkena pengaruh temperatur serta tekanan yang berlangsung sangat lama. Menurut Kent. A. J. (1993), batubara merupakan suatu jenis mineral yang tersusun atas karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur, dan senyawa- senyawa mineral. Dari dua definisi diatas, dapat disimpulkan bahwa batubara merupakan bahan bakar fosil atau batuan sedimen organic yang dibentuk oleh hasil temperatur dan tekanan pada sisa-sisa tanaman. Batubara terdiri dari campuran karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, belerang, serta merkuri, selenium, arsenik, fluor, dan lain-lain. Batubara terbagi menjadi dua kelompok utama yaitu batubara termal. Batubara jenis ini biasa digunakan sebagai pembangkit listrik. Selanjutnya ada batubara metalurgi biasa digunakan sebagai salah satu bahan utama dalam industri metalurgi (Ayuhati, 2018). Batubara juga mengandung kelembaban dan mineral.

Batubara memiliki 4 jenis yaitu batubara antrasit, bituminus, subbituminus, dan lignit. Batubara antrasit merupakan batubara dengan kadar karbon tertinggi dan kadar air terendah sehingga merupakan batubara dengan kualitas yang paling baik. Batubara bituminus memiliki kadar air sebesar 8 hingga 10% dengan kandungan karbon sebesar 68 hingga 86%. Batubara jenis subbituminous memiliki kadar karbon sebesar 35 hingga 45% dengan kadar air sebesar 10 hingga 45%. Selanjutnya batubara jenis lignit merupakan batubara dengan kadar karbon terendah yaitu 25 hingga 35% dan memiliki kadar air tertinggi yaitu sebesar 30 hingga 60%

Menurut Pusat Sumber Daya Geologi Kementrian ESDM Republik Indonesia, penentuan kualitas batubara dapat dilakukan dengan proses analisa kimia pada batubara di laboratorium berupa analisis proksimat, analisis ultimat dan nilai kalor. Penentuan proksimat meliputi penentuan kandungan kadar air, zat terbang, abu dan karbon tertambat dalam batubara. Semakin tinggi kadar air dan abu, kalori yang dihasilkan akan semakin rendah. Zat terbang yang tinggi dapat menyebabkan batubara terbakar dengan sendiri (*self burning*) (Iudhi Oki Prahesthi, 2015). Kadar air dalam batubara dapat mempengaruhi pembakaran batubara karena proses penguapan kadar air tersebut akan memakan energi dan mengambat proses pembakaran. Persamaan di bawah ini dapat digunakan untuk menghitung persen kadar air dalam batubara.

$$\%MC = \frac{M_W - M_D}{M_W} \times 100\%$$

M_W = Massa batubara basah (kg)

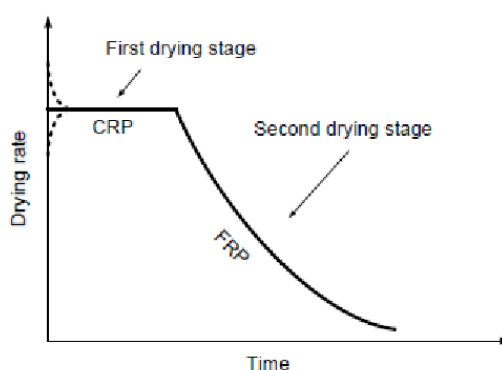
M_D = Massa batubara kering (kg)

Menurut Balai Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Desain, nilai kalor (*heating value*) merupakan salah satu parameter penting dalam kualitas bahan bakar. Nilai kalor adalah jumlah energi yang dilepaskan ketika suatu bahan bakar dibakar secara sempurna dalam suatu proses aliran tunak. Terdapat 2 jenis nilai kalor 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 terpengaruh oleh faktor lingkungan.

2.2.2 Pengerinan

Pengerinan adalah proses perpindahan massa dengan menghilangkan kandungan cairan melalui penguapan dari sebuah produk. Kandungan air suatu produk dapat mempengaruhi sifat dari produk tersebut. Pada batubara, kandungan kadar air menentukan golongan kualitas dari batubara tersebut. Batubara dengan kandungan air yang rendah merupakan batubara dengan kualitas tinggi dan memiliki harga yang relatif mahal.

Pada penelitian ini, digunakan batubara dengan kualitas rendah untuk mengurangi kadar air sehingga menaikkan kualitas dari batubara tersebut. Kandungan kadar air yang tinggi dalam batubara menyebabkan *heating valuenya* rendah. Hal ini mengakibatkan pembakaran batubara tersebut menghasilkan energi yang kurang optimal dan efisien dan dapat merusak *boiler* serta *pulverizer*. Sehingga proses pengeringan ini penting untuk dilakukan. Saat suatu produk basah dikeringkan, produk tersebut akan mengalami 2 tahapan proses. Tahapan yang pertama adalah proses transfer massa dari produk yang dikeringkan ke udara pengering sehingga terjadi penguapan *moisture content* dari produk tersebut. Selanjutnya akan terjadi proses difusi dari *internal moisture* menuju permukaan dari benda yang dikeringkan.



Gambar 2. 21 Perubahan Laju Pengerinan terhadap Waktu

Garis putus-putus menunjukkan tingkat pengeringan jika suhu awal lebih tinggi atau lebih rendah dari suhu produk basah yang akan dikeringkan. Dari gambar di atas pada stase pertama pengeringan, kelembaban bebas di permukaan suatu produk menguap dari permukaan dan laju pengeringan ditentukan oleh laju difusi uap air ke udara sekitarnya. Selama periode laju pengeringan konstan ini (CRP) uap air diangkut dari bagian dalam produk berpori ke permukaan oleh gaya kapiler. Selama laju penguapan dari permukaan dapat dipertahankan, maka laju pengeringan akan tetap konstan. Jika kadar air mencapai tingkat kritis di mana uap

air tidak dapat lagi mencapai permukaan pada tingkat yang cukup, pengeringan lebih lanjut akan menyebabkan kelembaban relatif permukaan turun di bawah 100% sehingga stase pengeringan kedua (FRP) akan dimulai. Laju pengeringan ditentukan oleh transportasi difusi kelembaban internal. Sebagai bahan mengering, pergerakan uap air semakin berkurang dan akibatnya laju pengeringan turun. Laju pengeringan terus turun sampai kadar air di dalam bahan berada dalam kesetimbangan dengan udara sekitarnya. Pada saat itu laju pengeringan menjadi nol dan pengeringan berhenti.

2.2.3 Perpindahan Panas dan Massa

Pengeringan batubara dilakukan dengan 2 proses. Proses yang pertama adalah pemansasan udara pengering menggunakan *heat exchanger* yang dilewati air dari drum yang telah dipanaskan. Selanjutnya batubara dikeringkan di *drying chamber* menggunakan udara pengering tadi dengan *bed* pengeringan yang telah ditentukan. Perpindahan panas yang terjadi pada proses pengeringan batubara ini adalah perpindahan yang terjadi pada *medium solid* yaitu permukaan batubara dengan *moving fluid* yaitu udara. Hal ini mengakibatkan perpindahan panas yang terjadi dapat diasumsikan terjadi secara konveksi. Laju perpindahan panas saat pengeringan oleh udara pengering terhadap batubara dipengaruhi oleh nilai koefisien konveksi perpindahan panas, luasan permukaan batubara, dan perbedaan temperatur antara udara pengering dan permukaan batubara. Berikut merupakan persamaan hubungan antara laju perpindahan panas antara udara pengering dan batubara (Incropera, 2005).

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

Keterangan:

Q = laju perpindahan panas (W)

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)

A = luas permukaan batubara (m²)

T_{∞} = temperatur udara pengering (K)

T_s = temperatur permukaan batubara (K)

Besarnya nilai koefisien konveksi pada persamaan di atas dapat dicari menggunakan persamaan *Nusselt Number*. *Nusselt Number* merupakan besaran tak berdimensi yang menunjukkan laju konversi energi dari permukaan (Lasode, 2020). *Nusselt Number* adalah fungsi dari bilangan *Reynold* dan *Prandtl* (Incropera, 2005). Bilangan *Reynold* adalah rasio gaya inersia terhadap gaya viskositas. Bilangan *Reynold* adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengkategorikan sistem fluida di mana efek viskositas penting dalam mengendalikan kecepatan atau pola aliran fluida (Bill Rehm, 2009). Bilangan *Prandtl* adalah bilangan tak berdimensi yang merupakan rasio dari momentum dan thermal diffusivity. Dengan mengasumsikan bentuk batubara sebagai bola, maka dapat digunakan korelasi *Whitaker* pada persamaan di bawah ini untuk menentukan nilai *Nusselt number* (Incropera, 2005).

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

$$Nu_D = 2 + (0.4Re_D^{1/2} + 0.06Re_D^{2/3}) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{1/4}$$

$$Nu = \frac{h \times D}{k_f}$$

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

$$Pr = \frac{v}{\alpha}$$

Keterangan:

Nu = Nusselt Number

Re = Reynold Number

Pr = Prandtl Number

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)

D = diameter batubara (mm)

k_f = koefisien konduksi perpindahan panas (W/m²K)

ρ = massa jenis udara pengering (kg/m³)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

μ = viskositas absolut udara pengering (m²/s)

Dari tiga persamaan di atas, dapat kita lihat bahwa semakin besar nilai *Reynold Number* dan nilai *Prandtl Number* maka nilai *Nusselt Number* juga semakin besar. Semakin besarnya nilai dari *Nusselt Number* juga akan membuat nilai dari koefisien konveksi perpindahan panas semakin membesar sehingga laju perpindahan panas yang terjadi akan meningkat.

Pada saat dilakukannya proses pengeringan, *moisture content* di dalam produk yang dikeringkan akan berpindah secara difusi ke permukaan produk tersebut. Dikarenakan adanya perpindahan panas secara konveksi antara udara pengering dan produk yang dikeringkan tersebut, *moisture content* akan menguap dan terbawa bersama udara pengering. Dalam hal ini, produk yang dikeringkan adalah batubara. Perpindahan *moisture content* selama proses pengeringan berlangsung tersebut merupakan bentuk perpindahan massa. Dengan mengasumsikan bentuk batubara sebagai bola, maka digunakan korelasi *Whitaker* pada persamaan di bawah ini untuk mendapatkan laju perpindahan massa maupun koefisien perpindahan massa yang terjadi (Theodore L. Bergman, 2008).

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

$$Sh_D = 2 + \left(0.4Re_D^{\frac{1}{2}} + 0.06Re_D^{\frac{2}{3}} \right) Sc^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

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

$$N_A = h_m \times A_s (C_{A,s} - C_{A,\infty})$$

$$n_A = h_m \times A_s (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$$

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

Keterangan:

S_h = *Sherwood Number*

S_c = *Schmidt Number*

N_A = Laju perpindahan molar (kmol/s)

n_A = Laju perpindahan massa (kg/s)

n_A'' = *mass flux* (kg/s.m²)

$C_{A,s}$ = Konsentrasi uap permukaan bahan (kgmol/m³)

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

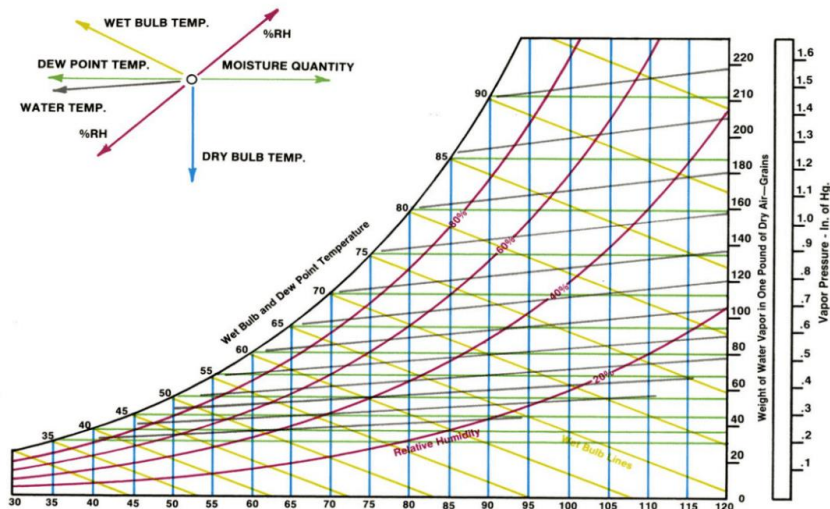
$\rho_{A,s}$ = Massa jenis uap air jenuh pada permukaan batubara (kg/m³)

$\rho_{A,\infty}$ = Massa jenis uap air udara pengering (kg/m³)

Sherwood Number didefinisikan sebagai bilangan tak berdimensi yang merupakan rasio perpindahan massa konvektif terhadap difusif (Wajih Hasan, 2019). *Sherwood Number* merupakan fungsi dari *Reynold Number* dan *Schmidt Number*. *Schmidt Number* adalah rasio antara difusivitas momentum dan difusivitas massa. Ketika nilai *Schmidt Number* rendah, partikel memiliki difusivitas yang besar, sangat kecil, dan hampir tidak dikondisikan oleh viskositas medium, sehingga mereka akan dengan mudah melintasi lapisan laminar yang menyelubungi permukaan halus ketika turbulensi sedang dan akan berdampak di permukaan (Camuffo, 2019).

2.2.4 Psychrometric Chart

Psychrometric Chart adalah sebuah grafik yang menunjukkan hubungan antara temperatur, kadar air, dan energi. Grafik ini memvisualisasikan hubungan timbal balik antara udara kering, kelembaban, dan energi. *Psychrometric chart* memiliki dua konsep dasar yaitu udara dalam ruangan adalah campuran udara kering dan uap air dan terdapat sejumlah energi tertentu dalam campuran pada temperatur dan tekanan tertentu. Untuk memahami hubungan antara uap air, udara, dan temperatur, ada dua kondisi yang dipertimbangkan yaitu, temperatur udara konstan, tetapi jumlah uap air meningkat dan temperatur udara turun, tetapi jumlah uap air konstan (Ross Montgomery P.E., 2008).



Gambar 2. 22 Psychrometric Chart dan Variabelnya

Psychrometric chart memiliki beberapa variable antara lain:

a. *Dry-Bulb Temperature*

Variable ini merupakan temperatur yang biasa diukur dari termometer. Penyebutan “*Dry-Bulb*” dikarenakan ujung penginderaan termometer kering. Temperatur ini terletak di horizontal, atau sumbu x, dari grafik *psychrometric* dan garis suhu konstan diwakili oleh garis grafik vertikal (EILEEN E. FABIAN (WHEELER), 2016).

b. *Wet-Bulb Temperature*

Variabel ini ditentukan ketika udara disirkulasikan melewati ujung sensor yang dibasahi. *Wet-Bulb Temperature* mewakili temperatur di mana air menguap dan membawa udara ke saturasi. Penentuan *Wet-Bulb Temperature* pada grafik ini mengikuti garis entalpi konstan, tetapi nilai terbaca dari batas suhu saturasi atas, melengkung (EILEEN E. FABIAN (WHEELER), 2016).

c. *Relative Humidity*

Relative Humidity adalah jumlah air yang dapat ditampung oleh udara pada temperatur tertentu. Ketika relative humidity mencapai 100%, maka udara tidak dapat lagi menampung lebih banyak uap air, sehingga air tidak dapat menguap pada udara dengan 100% RH tersebut. Pada 100% RH, nilai *Wet-bulb temperature* akan sama dengan nilai *Dry-Bulb Temperature*. Temperatur udara penting karena udara yang lebih hangat dapat menahan lebih banyak uap air daripada udara dingin. Pada RH lebih kecil dari 100%, maka nilai *Wet-bulb Temperature* akan lebih kecil dari

Dry-Bulb Temperature dan air dapat menguap ke udara. Garis variabel ini diwakili oleh garis lengkung yang membentang dari kiri bawah hingga ke kanan atas grafik. Garis untuk kelembaban relatif 100 persen (saturasi) adalah batas kiri atas dari grafik *psychrometric* (EILEEN E. FABIAN (WHEELER), 2016).

d. *Humidity Ratio*

Humidity Ratio adalah berat air yang terkandung di udara per unit udara kering. Variabel ini sering dinyatakan sebagai beban kelembaban per beban udara kering. Karena rasio kelembaban udara lembab tidak tergantung pada temperatur, seperti kelembaban relatif, variabel ini lebih mudah untuk digunakan dalam perhitungan. Rasio kelembaban ditemukan pada sumbu y vertikal dengan garis rasio kelembaban konstan yang berjalan horizontal melintasi grafik *psychrometric* (EILEEN E. FABIAN (WHEELER), 2016).

e. *Dewpoint Temperature*

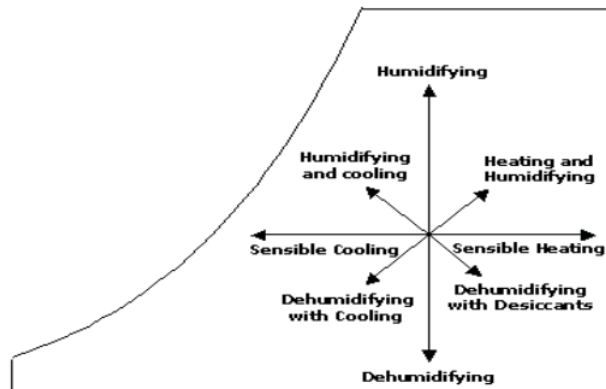
Dewpoint Temperature menunjukkan temperatur di mana air akan mulai mengembun dari udara lembab. Pada udara dengan *Dry-Bulb Temperature* dan kelembaban relatif tertentu, jika suhu dibiarkan turun, udara tidak dapat lagi menahan kelembaban sebanyak itu. Ketika udara didinginkan, kelembaban relatif meningkat sampai saturasi tercapai dan kondensasi terjadi. Kondensasi terjadi pada permukaan yang berada pada atau di bawah suhu titik embun. Temperatur titik embun ditentukan dengan bergerak dari titik keadaan horizontal ke kiri sepanjang garis rasio kelembaban konstan sampai batas temperatur jenuh atas tercapai (EILEEN E. FABIAN (WHEELER), 2016).

f. *Enthalpy*

Enthalpy merupakan kandungan energi panas dari udara lembab. Variabel ini dapat dinyatakan dalam Btu per pon udara kering dan mewakili energi panas karena temperatur dan kelembaban di udara. *Enthalpy* berguna dalam aplikasi pemanasan dan pendinginan udara. Skala *enthalpy* terletak di atas saturasi pada batas atas grafik *psychrometric*. Garis *enthalpy* konstan berjalan secara diagonal ke bawah dari kiri ke kanan melintasi grafik. Garis *enthalpy* konstan dan *Wet-Bulb* konstan sama pada grafik *psychrometric* ini, tetapi nilainya dibaca dari skala yang terpisah. Grafik *psychrometric* yang lebih akurat menggunakan garis yang sedikit berbeda untuk temperatur dan *Wet-Bulb enthalpy* (EILEEN E. FABIAN (WHEELER), 2016).

g. *Specific Volume*

Specific Volume menunjukkan ruang yang ditempati oleh udara. Variabel ini adalah kebalikan dari kepadatan dan dinyatakan sebagai volume per satuan berat. Udara hangat kurang padat daripada udara dingin sehingga menyebabkan udara hangat naik. Fenomena ini dikenal sebagai daya apung *thermal*. Dengan alasan yang sama, udara yang lebih hangat memiliki volume spesifik yang lebih besar dan karenanya lebih ringan daripada udara dingin. Pada grafik *psychrometric*, garis-garis volume spesifik konstan hampir berbentuk seperti garis vertikal dengan nilai skala ditulis di bawah skala *Dry-Bulb Temperature* dan di atas skala *temperature* saturasi batas atas (EILEEN E. FABIAN (WHEELER), 2016).



Gambar 2. 23 Proses pada Psychrometrics Chart

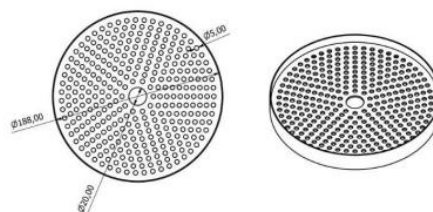
2.2.5 Fluidized Bed

Fluidized bed cukup terkenal pada industri yang melibatkan kontak dan interaksi antara cairan dan padatan. Teknologi *fluidized bed* telah digunakan di berbagai bidang seperti perawatan permukaan logam, pemulihan panas, penukar panas, gasifikasi, pembakaran bahan bakar padat, reaksi kimia endotermik dan eksotermik, pengolahan limbah dan pengolahan partikel seperti pendinginan, pemanasan, pemanggangan, pengeringan, pelapisan dan transportasi (Ahmmad Shukrie Md Yudin, 2011).

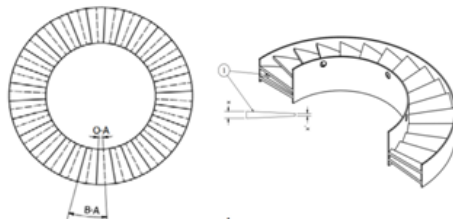
Pada penelitian ini *fluidized bed* digunakan untuk mengeringkan batubara dengan cara melewati aliran uap panas secara horizontal melalui sisi bawah *drying chamber* menggunakan *blower*. Di bagian tengah *drying chamber* terdapat sebuah *drying bed* dengan jenis tertentu. *Drying bed* yang digunakan pada penelitian ini adalah *perforated plate* atau *plate* dengan beberapa lubang berdiameter sama pada tengahnya dan *single row blade* atau *plate* yang tersusun dari satu baris *blade* dengan penempatan sudut tertentu sebagai pengarah aliran.



Gambar 2. 24 Drying Chamber



Gambar 2. 25 Perforated Plate



Gambar 2. 26 Single Row Blade

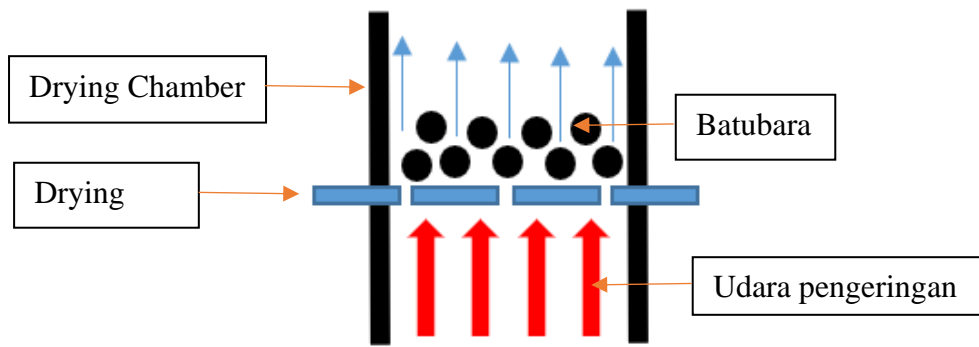
Batubara kemudian diletakkan di atas *drying bed* dan diangkat secara vertikal oleh udara yang dihembuskan oleh *blower*. Batubara yang diletakkan di atas *drying bed* dikatakan mengalami fluidisasi ketika udara dari *drying chamber* telah mengangkat semua partikel batubara sepenuhnya dari *drying bed*. Kondisi ini dinyatakan sebagai kondisi minimum fluidisasi dan kecepatan gas yang dibutuhkan disebut sebagai kecepatan minimum fluidisasi. Apabila diamati secara seksama, aliran udara pengeringan saat menggunakan *drying bed* berbentuk *single row blade* akan berbentuk lebih spiral. Aliran udara pengering saat menggunakan perforated plate akan terlihat vertikal ke atas meskipun sebenarnya tetap sedikit memutar karena tidak ada sudut pengarah pada *drying bed* yang dilewati udara pengering sehingga putaran dari proses pengeringan batubara ini tidak terlihat dengan jelas.



Gambar 2. 27 Penggunaan Drying Bed Perforated Plate



Gambar 2. 28 Penggunaan Drying Bed Single Row Blade



Gambar 2. 29 Skema Aliran Udara Pengering

$$\sum F = 0$$

$$DF - W = 0$$

$$DF = W$$

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

$$V = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{batubara} \times \forall \times g}{Cd \times \rho_{udara} \times A}}$$

Keterangan:

DF = Drag Force (kg m/s²)

W = Berat batubara (kg m/s²)

Cd = Koefisien drag batubara

A = Luas batubara (m²)

V = Kecepatan minimum fluidisasi batubara (m/s)

∅ = Volume batubara (m³)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

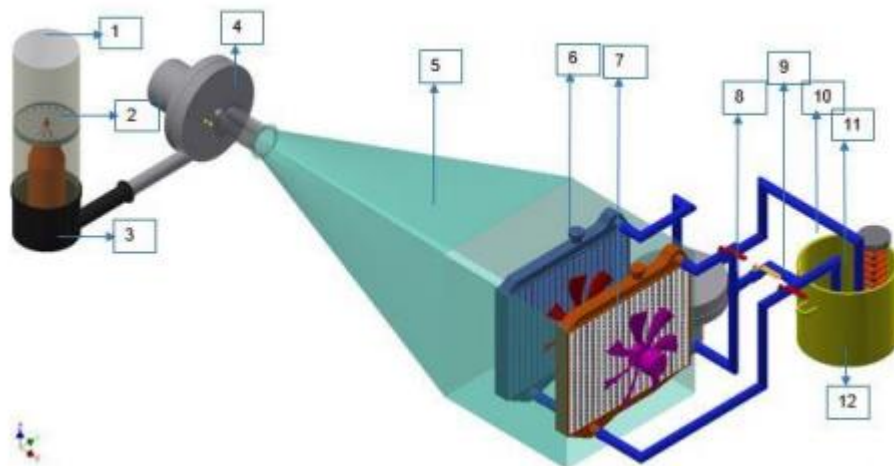
ρ = massa jenis (kg/m³)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Eksperimen

Penelitian dilaksanakan berdasarkan pada eksperimen sebelumnya oleh Al Velian Suci Hadi Widarwis (2018). Desain *drying chamber* yang digunakan tetap yaitu posisi *drying bed* dipasang dengan ujung *metal cone* sehingga aliran udaranya tidak dipengaruhi oleh *metal cone*. Desain plate yang sebelumnya hanya *perforated*, diubah menjadi 2 jenis *drying bed* yaitu *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm dan *single row blade* dengan sudut 20°. Alat ini didesain untuk mengeringkan batubara dengan udara sebagai media pengering dengan suhu $\pm 50^{\circ}\text{C}$. Batubara yang digunakan pada eksperimen ini dipecah terlebih dahulu menjadi butiran batubara berbentuk granula dengan diameter $\pm 4,75$ mm dan berbentuk bola. Instalasi skema peralatan penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1.

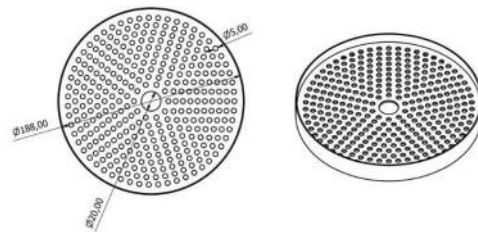


Gambar 3. 1 Instalasi Alat Eksperimen

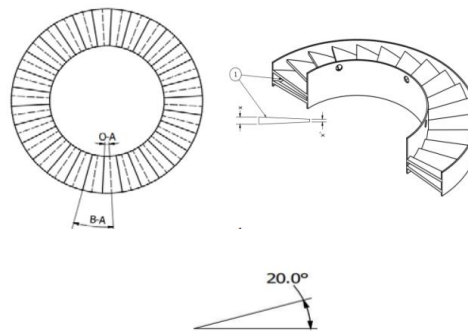
Keterangan:

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

Pengamatan yang dilakukan pada eksperimen ini adalah pengamatan pada proses pengeringan batubara di dalam *drying chamber*. Laju pengeringan batubara dapat diketahui dengan memasang RH meter yang dapat mendeteksi *relative humidity* dan temperatur pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber*. Selanjutnya RH meter disambungkan pada software ElitechLogWin V6.2.0 yang akan ditampilkan pada layar komputer untuk mengetahui nilai temperatur dan *relative humidity* yang terdeteksi oleh RH meter tersebut. Udara pengering masuk melalui sisi bawah samping *chamber* setelah dihembuskan oleh *centrifugal blower* melalui selongsong. *Perforated plate* dan *single row blade* ditempatkan pada sisi tengah *drying chamber* tepat sebelum udara mengenai batubara secara bergantian sebagai pengarah udara. Besarnya diameter lubang pada *perforated plate* dan sudut pada *single row blade* ini akan mempengaruhi kecepatan udara yang melalui plate tersebut. Kecepatan udara pengering diukur menggunakan anemometer ketika *drying bed* dipasang pada *chamber*. Profil *perforated plate* dan *single row blade* pada *bed coal dryer* ini ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



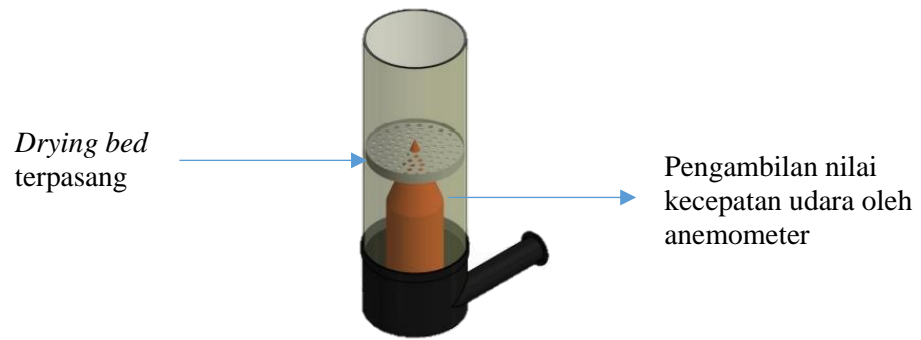
Gambar 3. 2 Perforated Plate



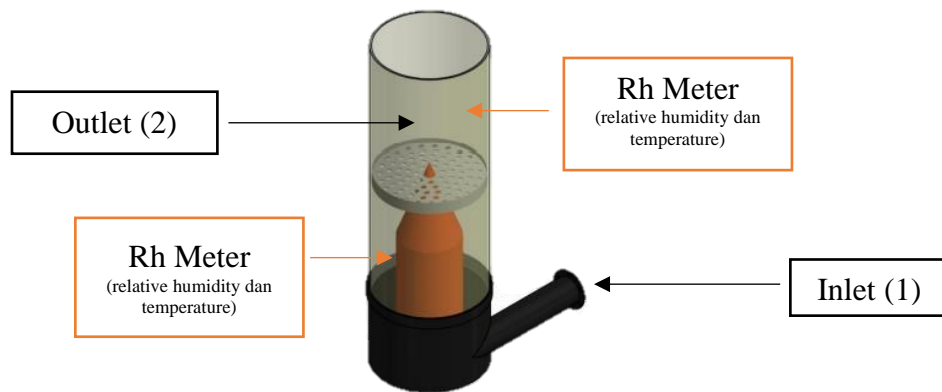
Gambar 3. 3 Single Row Blade

3.1.1 Posisi Pengukuran dan Pengambilan Data

Pada penelitian ini, terdapat beberapa data yang akan diambil yaitu temperatur 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* belum terpasang.



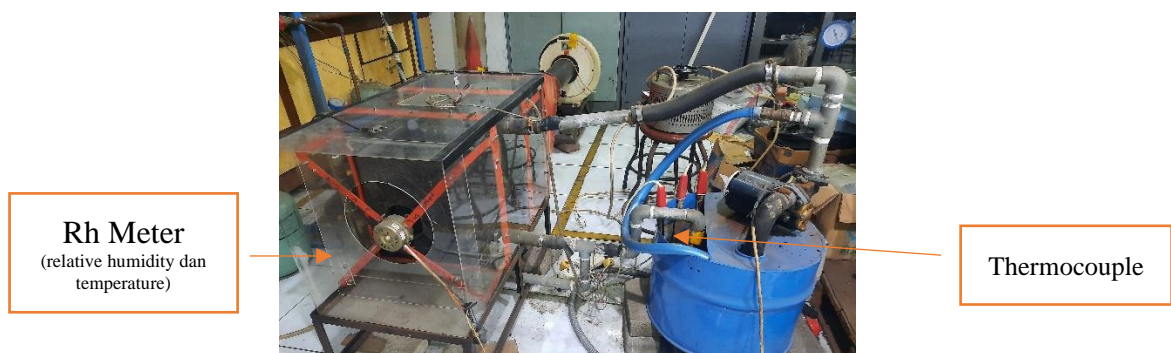
Gambar 3. 4 Posisi Pengukuran Kecepatan Udara Pengering



Gambar 3. 5 Posisi Pengambilan Data Menggunakan RH Meter

keterangan:

- a. 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.
- b. Pada posisi (2) dipasang RH meter Elitech RC 4HC untuk membaca *temperature* dan nilai *relative humidity* dari udara pengering yang telah melewati batubara.



Gambar 3. 6 Posisi Pengambilan Nilai Temperatur dan Relative Humidity Inlet Fan Radiator, dan Nilai Temperatur Air pada Drum

3.1.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut

3.1.2.1 Variabel Bebas

1. Lubang pada *perforated plate* dan sudut pada *single row blade*
Besarnya lubang yang terdapat di *perforated plate* adalah 5 mm dan besarnya sudut pada *single row blade* yang digunakan adalah 20 derajat.
2. *Volt Centrifugal blower*
Voltage input centrifugal blower ditentukan dengan menggunakan *voltage regulator* yang terhubung dengan *input power* dari sentrifugal *blower*. Penentuan besarnya *volt* dilakukan dengan mengkalibrasi *voltage regulator* terhadap sentrifugal *blower* dengan menggunakan alat ukur kecepatan udara, yaitu anemometer.
3. Kecepatan *inlet* udara pengering
Kecepatan inlet divariasikan masing-masing pada 3 nilai, yaitu sebesar 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s. Perubahan nilai kecepatan inlet diatur dengan mengubah besarnya *voltage* sentrifugal *blower* dan mengukurnya menggunakan anemometer.

3.1.2.2 Variabel Tetap

1. Dimensi peralatan eksperimen
Peralatan eksperimen *coal dryer* ini terdiri dari:
 - a. tangki air
 - b. *drying chamber* dengan diameter luar sebesar 199,5 mm, diameter dalam sebesar 190 mm, dan tinggi dinding *chamber* sebesar 1,5 mm
 - c. *compact heat exchanger* dengan dua buah kipas
 - d. sistem perpipaan air
 - e. *ducting* aliran udara

Dimensi seluruh peralatan pada alat eksperimen *coal dryer* ini tetap selama dilakukannya proses eksperimen.

2. Diameter batubara
Batubara yang digunakan diasumsikan berbentuk granula. Batubara sebelum dikeringkan akan dipecahkan terlebih dahulu dan disaring menggunakan mesh berdiameter $\pm 4,4$ mm dan mesh berdiameter ± 5 mm hingga batubara dapat diasumsikan berdiameter rata-rata $\pm 4,75$ mm.
3. Temperatur *inlet* udara pengering
Temperatur udara *inlet coal dryer* diatur tetap pada temperatur $\pm 50^{\circ}\text{C}$ dengan kendali oleh *thermocouple* pada tangki air. Pengaturan temperatur *inlet* udara pengering ini tercapai dengan menjaga temperatur air sebagai fluida panas pada sisi *tube heat exchanger* pada temperatur $\pm 70^{\circ}\text{C}$.

3.2 Peralatan Penunjang Eksperimen

Berikut merupakan beberapa peralatan penunjang yang akan digunakan dalam pelaksanaan eksperimen

a. *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.

b. *Data Logger*

Dibutuhkan data akuisisi sebagai pembaca temperatur 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*.

c. RH meter

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 temperatur, maka tidak diperlukan lagi *thermocouple* pada *inlet* dan *outlet drying chamber*.

d. 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*.

e. *Toolkit*

Toolkit yang digunakan dalam eksperimen ini adalah tang, gunting, palu, dan mesh diameter $\pm 4,4$ mm untuk tahap persiapan dan separasi instalasi seperti, separasi cerobong, perangkaian *thermocontrol*, dan proses pemecahan dan penyaringan batubara.

f. *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 $\pm 70^{\circ}\text{C}$

g. *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*.

h. Timbangan Beban dan Timbangan Digital

Timbangan digunakan untuk mengukur massa batubara yang akan dikeringkan tiap kali 1 percobaan yaitu sebesar 400 gr. 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.

i. Oven

Sampel batubara yang telah dikeringkan menggunakan *fluidized 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

Langkah-langkah yang dilakukan pada eksperimen ini meliputi studi literatur, tahap persiapan alat, pengambilan data eksperimen kemudian dilakukan pengolahan dan analisis berdasarkan data yang didapatkan.

3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui prinsip kerja *fluidized bed* terhadap pengeringan batubara, prinsip kecepatan fluidisasi, prinsip proses pengeringan, prinsip perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan batubara, dan prinsip karakteristik udara pada *psychrometric chart*.

3.3.2 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 dan ayakan berukuran ± 5 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 kecepatan dengan nilai sebesar 5 m/s, 7 m/s dan 9 m/s sehingga dibutuhkan batubara sebanyak 2400 gram untuk seluruh variasi.
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.

3.3.3 Pengambilan Data

1. Setelah alat sudah dipersiapkan, pastikan untuk menunggu hingga temperatur udara pada *inlet drying chamber* bernilai $\pm 50^{\circ}\text{C}$.
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 ± 3 gram sebagai sampel batubara ke-0.
4. Masukkan butiran batubara sejumlah 400 gram setelah temperatur udara mencapai angka $\pm 50^{\circ}\text{C}$.
5. Pengambilan sampel batubara dilakukan dengan interval waktu 1 menit selama 5 kali. Selanjutnya setiap sampel yang telah diambil dimasukan 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.

3.3.4 Analisis Data

Analisis data dilakukan berdasarkan data yang didapatkan dari hasil eksperimen dengan variasi berupa jenis *bed* pengeringan dan kecepatan pengeringan yang digunakan. Berikut merupakan variasi yang digunakan pada eksperimen ini

- a. *Drying bed* berupa *Perforated Plate* berdiameter 5 mm pada kecepatan 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s
- b. *Drying bed* berupa *Single Row Blade* dengan sudut 20° pada kecepatan 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s

Analisa data yang diperhitungkan antara lain massa batubara hasil pengeringan menggunakan *fluidized bed dryer*, massa batubara hasil pengeringan menggunakan oven, *moisture content* batubara, *drying rate*, *relative humidity inlet* dan *outlet* di *drying chamber*, *temperature inlet* dan *outlet* dari udara pengering, *relative humidity* dan *temperature inlet fan radiator*, dan karakteristik udara pengering dilihat dari *psychrometric chart*.

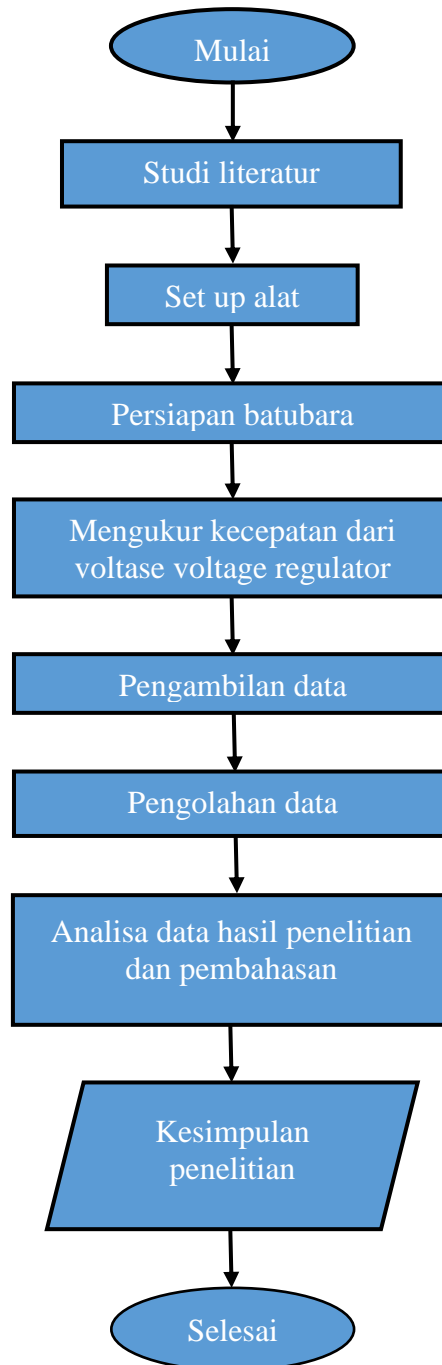
3.3.5 Lembar Pengambilan Data

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

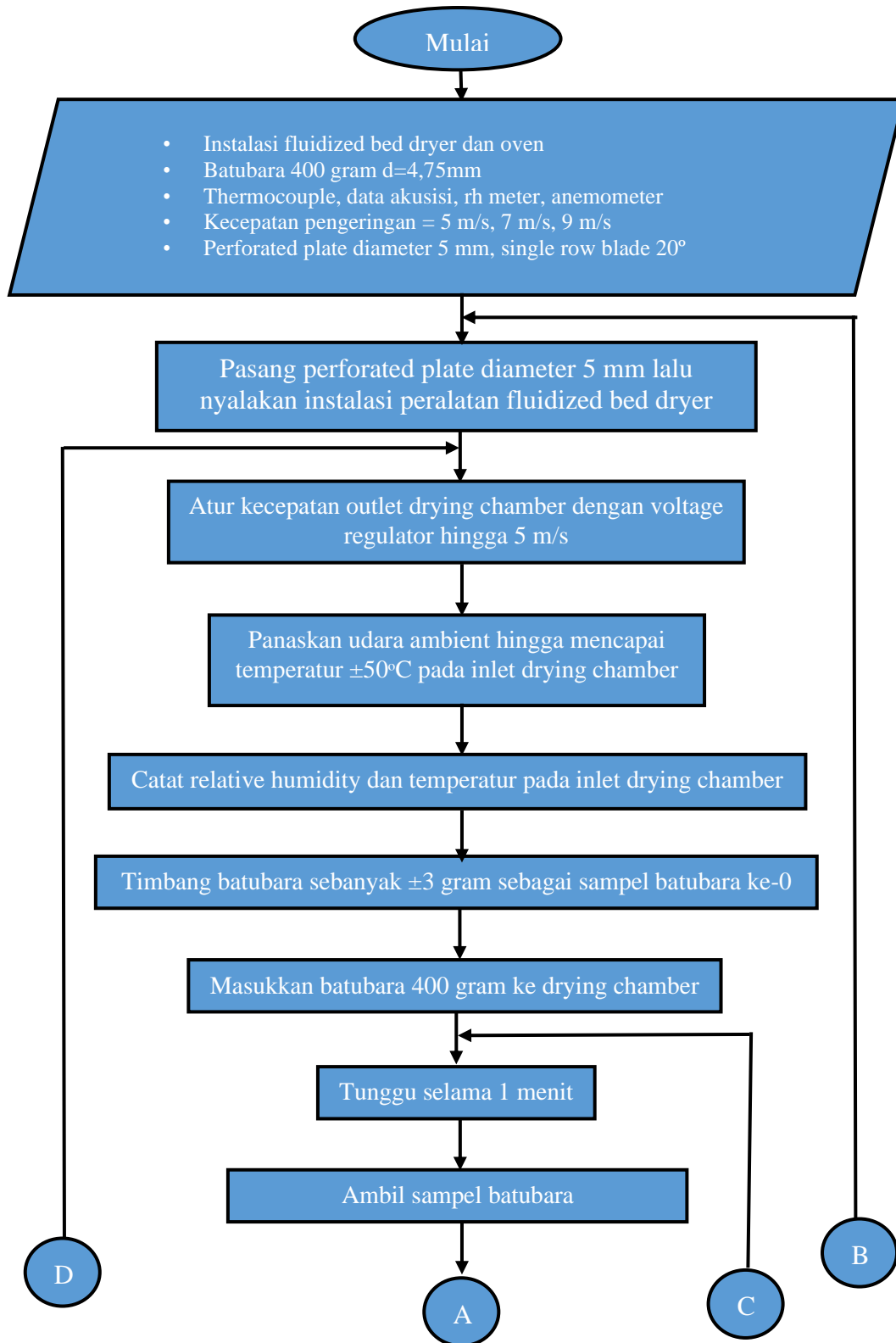
Tabel 3. 1 Lembar Pengambilan Data

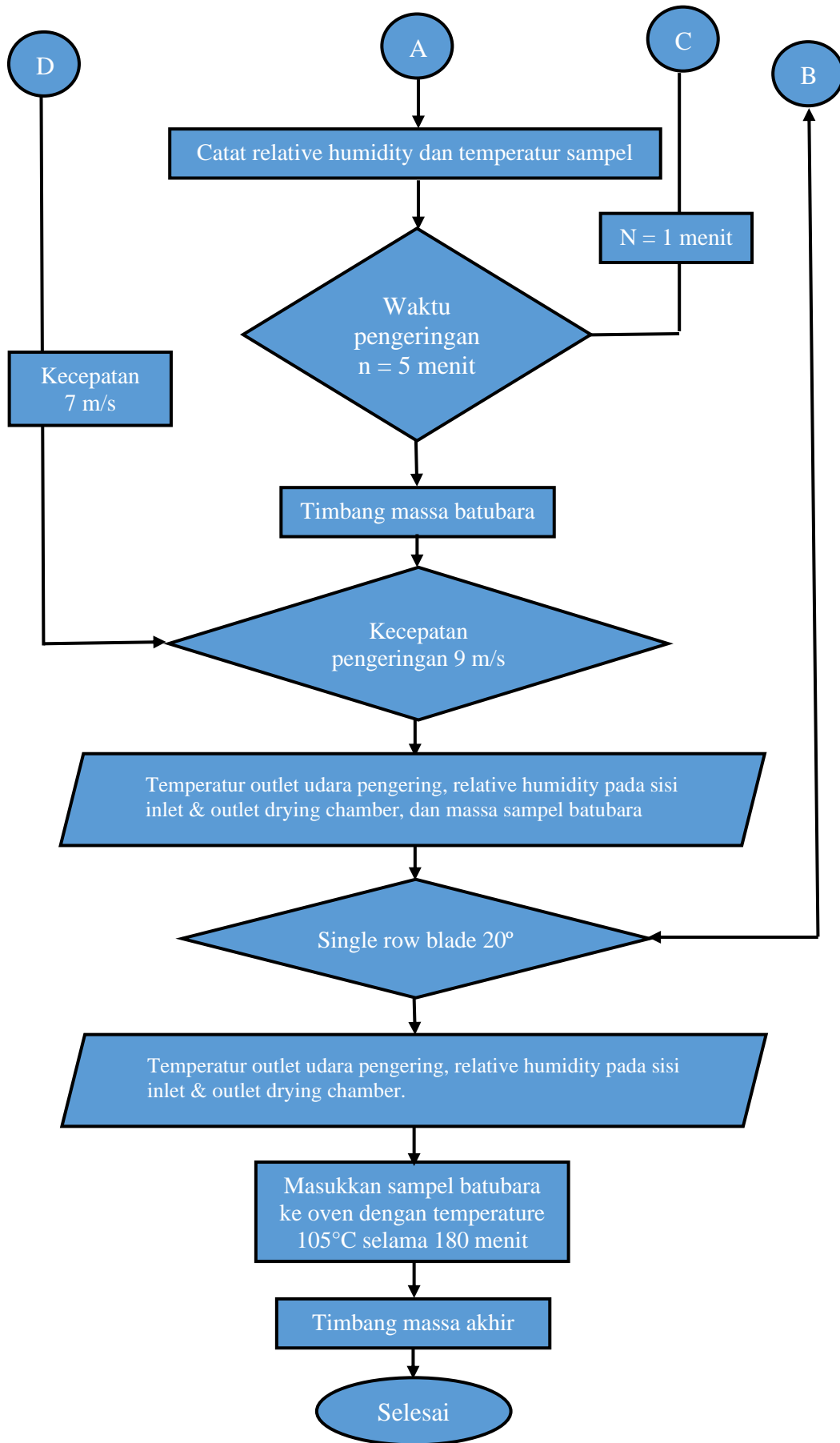
No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0						
2	1						
3	2						
4	3						
5	4						
6	5						

3.3.6 Flowchart Penelitian



3.3.7 Flowchart Eksperimen





3.3.8 Jadwal Kegiatan

Berikut ini adalah jadwal kegiatan yang akan dilakukan pada eksperimen ini.

Tabel 3. 2 Jadwal Kegiatan

No	Nama Kegiatan	Minggu ke-													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Studi pustaka	■	■	■	■	■	■								
2	Perancangan peralatan			■	■	■	■	■	■						
3	Survey lapangan				■	■	■	■	■	■					
4	Eksperimen					■	■	■	■	■	■	■			
5	Analisa						■	■	■	■	■	■			
6	Pengolahan data						■	■	■	■	■	■			
7	Pelaporan kemajuan					■	■	■	■	■	■	■	■		
8	Pembuatan abstrak seminar												■	■	
9	Penyusunan laporan akhir												■	■	■

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

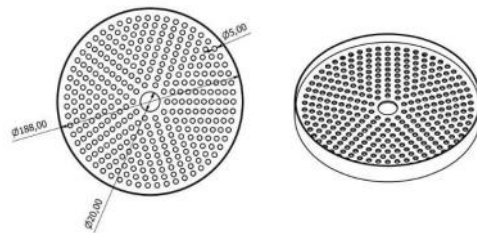
Hasil dari penelitian pengeringan batubara ini adalah massa basah batubara, massa kering batubara, temperatur *inlet* dan *outlet chamber*, serta *relative humidity* pada *inlet* dan *outlet drying chamber*. Berikut ini merupakan contoh perhitungan *flow open area bed* pengeringan, kecepatan minimum fludisasi batubara, *mass flow rate* udara pengering, massa uap air dan *drying rate* dari sisi udara, *moisture content* dan *drying rate* dari sisi batubara, koefisien perpindahan panas, perpindahan massa teoritis, dan perbandingan koefisien perpindahan massa teoritis terhadap koefisien perpindahan massa aktual hasil penelitian. Data hasil eksperimen secara lengkap terlampir pada lampiran laporan tugas akhir ini.

4.1.1 Contoh Perhitungan *Flow Open Area Bed* Pengeringan

Flow open area dari masing-masing jenis *bed* pengeringan memengaruhi laju aliran udara yang melewati *bed* pengeringan untuk mengeringkan batubara. Berikut ini merupakan contoh perhitungan *flow open area* dari *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm dan *single row blade* dengan sudut 20°.

a. *Flow Open Area Perforated Plate D 5 mm*

Bentuk *perforated* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar , luasan *flow open area* pada *perforated plate* merupakan jumlah luasan lubang dengan diameter 5 mm yang dilewati oleh udara pengering yang masuk ke *chamber* selama proses pengeringan batubara berlangsung.



Gambar 4. 1 Desain Bed *Perforated Plate*

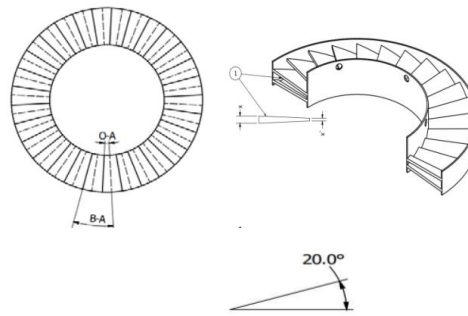
$$A_{\text{perforated plate}} = L_{\text{lubang}} \times \text{Total Lubang}$$

$$L_{\text{lubang}} = \frac{\pi}{4} \times d^2 = \frac{3,14}{4} \times 5\text{mm}^2 = 19,625\text{mm}^2$$

$$A_{\text{perforated plate}} = 19,625 \times 325 \text{ lubang} = 6378,125\text{mm}^2$$

b. *Flow Open Area Single Row Blade* dengan Sudut 20°

Bentuk *single row blade* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar , luasan *flow open area* pada *single row blade* ini merupakan jumlah luasan ruang antara 2 *blade* dengan sudut 20° yang dilewati oleh udara pengering yang masuk ke *chamber* selama proses pengeringan batubara berlangsung.



Gambar 4. 2 Desain Bed Single Row Blade

$$A_{\text{single row blade}} = \left(L_{\text{vane}} - (\text{Total plate} \times \text{tebal} \times (d_{\text{out vane}} - d_{\text{in vane}})) \right) \times \sin 10$$

$$L_{\text{vane}} = \frac{\pi}{4} \times (d_{\text{out vane}}^2 - d_{\text{in vane}}^2) = \frac{3.14}{4} \times (188,5\text{mm}^2 - 105\text{mm}^2) = 19238,19125\text{mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_{\text{single row blade}} &= \left(19238,19125\text{mm}^2 - (30 \times 1\text{mm}(188,5\text{mm} - 105\text{mm})) \right) \times \sin 20 \\ &= (19238,19125\text{mm}^2 - 2505\text{mm}^2) \times \sin 20 \\ &= 16733,19125 \times \sin 20 = 5723,088\text{mm}^2 \end{aligned}$$

Dari 2 perhitungan *flow open area* di atas, terlihat bahwa luasan bukaan untuk udara pengering pada proses pengeringan batubara terlihat cukup sama nilainya pada saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dan *single row blade* sehingga hasil pengeringan dapat dibandingkan.

4.1.2 Contoh Perhitungan Kecepatan Minimum Fluidisasi Batubara

Batubara yang diletakkan di atas *drying bed* dikatakan mengalami fluidisasi ketika udara dari *drying chamber* telah mengangkat semua partikel batubara sepenuhnya dari *drying bed*. Kondisi ini dinyatakan sebagai kondisi minimum fluidisasi dan kecepatan gas yang dibutuhkan disebut sebagai kecepatan minimum fluidisasi. Apabila diamati secara seksama, aliran udara pengeringan saat menggunakan *drying bed* berbentuk *single row blade* akan berbentuk lebih spiral. Aliran udara pengering saat menggunakan *perforated plate* akan terlihat vertikal ke atas meskipun sebenarnya tetap sedikit memutar karena tidak ada sudut pengarah pada *drying bed* yang dilewati udara pengering sehingga putaran dari proses pengeringan batubara ini tidak terlihat dengan jelas.

$$v = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{\text{batubara}} \times \nabla \times g}{Cd_{\text{bola}} \times \rho_{\text{udara}} \times A}}$$

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

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

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

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

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

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 1450 \times 0,561 \times 10^{-7} \times 9,81}{0,47 \times 1,084 \times 0,708 \times 10^{-4}}} = 6,652 m/s$$

4.1.3 Contoh Perhitungan *Mass Flow Rate* Udara Pengering

Besar nilai laju massa aliran udara dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$\dot{m} = \rho \times v \times A_C$$

A_C merupakan luasan *drying chamber* dimana udara pengeringan diukur tanpa adanya *bed* pengeringan apapun yang dipasang. v merupakan nilai kecepatan rata-rata inlet udara pengering yang memasuki *drying chamber*. Dengan menggunakan 3 variasi kecepatan udara pengering dan 2 jenis *bed* pengeringan, maka nilai laju massa aliran udaranya pasti akan berbeda pula. Berikut ini merupakan contoh perhitungan laju massa udara dari 2 jenis *bed* yang digunakan.

4.1.3.1 Contoh Perhitungan *Mass Flow Rate* Udara Pengering Kecepatan 5m/s

$$\rho_{udara}(49,5^\circ C) = 1,09 kg/m^3$$

$$A_C = \frac{\pi}{4} \times d_{chamber}^2 = \frac{3,14}{4} \times 190^2 = 28.338,5 mm^2$$

$$v_{rata-rata inlet udara pengering} = 3 m/s$$

$$\dot{m} = 1,09 \times 3 \times 0,0283385 = 0,0928 kg/s$$

4.1.3.2 Contoh Perhitungan *Mass Flow Rate* Udara Pengering Kecepatan 7m/s

$$\rho_{udara}(49,5^\circ C) = 1,09 kg/m^3$$

$$A_C = \frac{\pi}{4} \times d_{chamber}^2 = \frac{3,14}{4} \times 190^2 = 28.338,5 mm^2$$

$$v_{rata-rata inlet udara pengering} = 4 m/s$$

$$\dot{m} = 1,09 \times 4 \times 0,0283385 = 0,1236 kg/s$$

4.1.3.3 Contoh Perhitungan *Mass Flow Rate* Udara Pengering Kecepatan 9m/s

$$\rho_{udara}(49,5^\circ C) = 1,09 kg/m^3$$

$$A_C = \frac{\pi}{4} \times d_{chamber}^2 = \frac{3,14}{4} \times 190^2 = 28.338,5 mm^2$$

$$v_{rata-rata inlet udara pengering} = 5 m/s$$

$$\dot{m} = 1,09 \times 5 \times 0,0283385 = 0,1544 kg/s$$

4.1.4 Contoh Perhitungan Massa Uap Air dan *Drying rate* Sisi Udara

Berikut ini merupakan contoh perhitungan massa uap air dan *drying rate* sisi udara pada penggunaan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s.

Tabel 4. 1 Properti Udara Pengering Pada Menit Pertama Bed Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 7m/s

Udara	Humidity Ratio (gr/kg dry air)	T (°C)	RH (%)
Inlet	12,06	49,5	16
Outlet	15,29	37	38,7

$$\Delta\omega_1 = \omega_{out} - \omega_{in} = 15,29 - 12,06 = 3,23 \text{ gr uap air/kg dry air}$$

$$m_{dry\ air} = \frac{\dot{m} \times waktu}{\omega_{in}(kg) + 1} = \frac{0,1236 \times 60}{0,01206 + 1} = 7,325 \text{ kg dry air}$$

$$m_{\omega_1} = \Delta\omega_1 \times m_{dry\ air} = 3,23 \frac{gr}{kg} \text{ dry air} \times 7,325 \text{ kg dry air}$$

$$m_{\omega_1} = 23,66 \text{ gr uap air}$$

4.1.5 Contoh Perhitungan *Moisture Content* dan *Drying rate* Sisi Batubara

Berikut ini merupakan contoh perhitungan nilai *moisture content* dan *drying rate* sisi batubara pada penggunaan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s.

Tabel 4. 2 Properti Massa Batubara Pada Menit Pertama Bed Perforated Plate dengan Diameter 5mm Kecepatan 7m/s

Menit	Massa Basah (gr)	Massa Kering (gr)	MC (%)
0	3,009	1,99	34
1	1,618	1,167	28

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

$$MC0 (\%) = \frac{3,009 - 1,99}{3,009} \times 100\% = 34\%$$

$$MC1 (\%) = \frac{1,618 - 1,167}{1,618} \times 100\% = 28\%$$

$$Drying\ rate = \frac{MC0 \times m\ uji - MC1 \times m\ uji}{waktu}$$

$$Drying\ rate = \frac{34\% \times 400\ gr - 28\% \times 400\ gr}{1\ menit} = 24 \frac{gr}{menit}$$

4.1.6 Contoh Perhitungan Nilai Efektivitas Eksperimen

Berikut ini merupakan contoh perhitungan nilai efektivitas eksperimen pada penggunaan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s pada menit pertama menggunakan data yang terlampir pada Tabel A.19.

$$\text{Efektivitas} = \frac{m \text{ air yang berpindah}}{m \text{ udara kering}}$$
$$\text{Efektivitas} = \frac{24 \text{ gram}}{7325 \text{ gram}} = 0,00327$$

4.1.7 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas

Berikut ini merupakan contoh perhitungan koefisien perpindahan panas sisi batubara pada penggunaan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s menggunakan data yang terlampir pada Tabel A.19. Koefisien perpindahan panas ini diukur ketika *bed* pengeringan tidak dipasang pada *drying chamber*.

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

$$\rho_{49,5} = 1,09 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 195,22 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$$

$$Re = \frac{1,09 \times 7 \times 4,75 \times 10^{-3}}{195,22 \times 10^{-3}} = \mathbf{1872,51}$$

$$Nu = \frac{h \times D}{k_f}$$

$$Nu = 2 + 0,6 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3}$$

$$Nu = 2 + 0,6 \times 1872,51^{1/2} \times 0,703^{1/3} = \mathbf{25,11}$$

$$h = \frac{Nu \times k_f}{D}$$

$$h = \frac{25,11 \times 0,0279}{4,75 \times 10^{-3}} = \mathbf{147,49 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

4.1.8 Contoh Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa Teoritis

Ditinjau dari perhitungan perpindahan panas dan massa selama berlangsungnya proses pengeringan batubara, terdapat keterkaitan antara besarnya nilai koefisien perpindahan panas dan massa dari pengeringan batubara tersebut. Hal ini dapat dibuktikan dengan rumus perhitungan sebagai berikut untuk menghitung nilai koefisien perpindahan massa teoritis sisi batubara pada penggunaan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s menggunakan data yang terlampir pada Tabel A.23. Koefisien perpindahan massa ini didapatkan dengan nilai koefisien perpindahan panas yang diukur ketika *bed* pengeringan tidak dipasang pada *drying chamber*.

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

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

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

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

$$T_s = 310 \text{ K}$$

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

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

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

$$h_m \text{ teoritis} = \frac{147,49 \times (322,5 - 310)}{2383,49 \times 10^3 \times (1,128 - 1,09)} = \mathbf{0,0204 \text{ m/s}}$$

4.1.9 Contoh Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa Aktual Hasil Penelitian

Perhitungan nilai koefisien perpindahan massa secara teoritis seharusnya memiliki nilai yang mirip atau sama dengan nilai koefisien perpindahan massa secara aktual. Namun, terkadang dapat terjadi perbedaan nilai aktual dan teori dikarenakan beberapa factor yang mungkin terjadi. Berikut ini merupakan perhitungan nilai koefisien perpindahan massa aktual sisi batubara pada penggunaan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s menggunakan data yang terlampir pada Tabel A.25. Nilai koefisien perpindahan massa ini didapatkan dari *properties* yang diukur setelah melewati *drying bed* pada *drying chamber*.

$$n_A = 24 \text{ gr/menit} = 4 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$\text{Berat batubara}_{\text{total}} = 400 \text{ gr}$$

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

$$\text{Berat batubara}_{1 \text{ butir}} = \rho \times \text{volume batubara}$$

$$\text{Berat batubara}_{1 \text{ butir}} = 1450 \times \frac{4}{3} \times 3,14 \left(\frac{4,75 \times 10^{-3}}{2} \right)^3 = \mathbf{0,081 \text{ gr}}$$

$$A_{\text{surface}} = \text{jumlah berat batubara} \times A_{\text{sur}} \text{ batubara}_{1 \text{ butir}}$$

$$A_{\text{surface}} = \frac{400}{0,081} \times 4 \times 3,14 \times \left(\frac{4,75 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 = \mathbf{0,35 \text{ m}^2}$$

$$h_m = \frac{n_A}{A_{\text{surface}} \times (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})}$$

$$h_m = \frac{4 \times 10^{-4}}{0,35 \times (1,128 - 1,09)} = \mathbf{0,03 \text{ m/s}}$$

4.1.10 Contoh Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Panas Aktual Hasil Penelitian

Dari perhitungan nilai koefisien perpindahan massa teoritis dan aktual pada sub bab 4.1.7 dan 4.1.8, terdapat perbedaan nilai koefisien perpindahan massa secara teoritis dan aktual.

Hal ini tentunya akan memengaruhi nilai koefisien perpindahan panas aktual yang terjadi selama proses pengeringan batubara. Berikut ini merupakan perhitungan nilai koefisien perpindahan panas aktual sisi batubara pada penggunaan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s menggunakan data yang terlampir pada Tabel A.21. Nilai koefisien perpindahan panas aktual ini diasumsikan didapat dari *properties* yang telah melewati *drying bed* pada *drying chamber*.

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

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

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

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

$$T_s = 310 \text{ K}$$

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

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

$$h_{m \text{ aktual}} = 0,028 \text{ m/s}$$

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

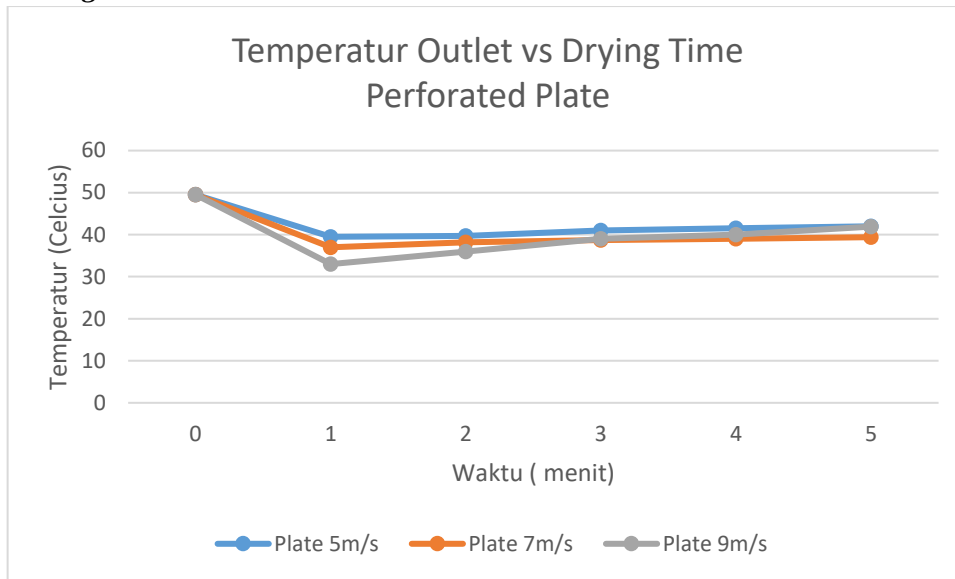
$$h = \frac{0,028 \times 2383,49 \times 10^3 \times (1,128 - 1,09)}{(322,5 - 310)} = 217,92 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.2 Pembahasan

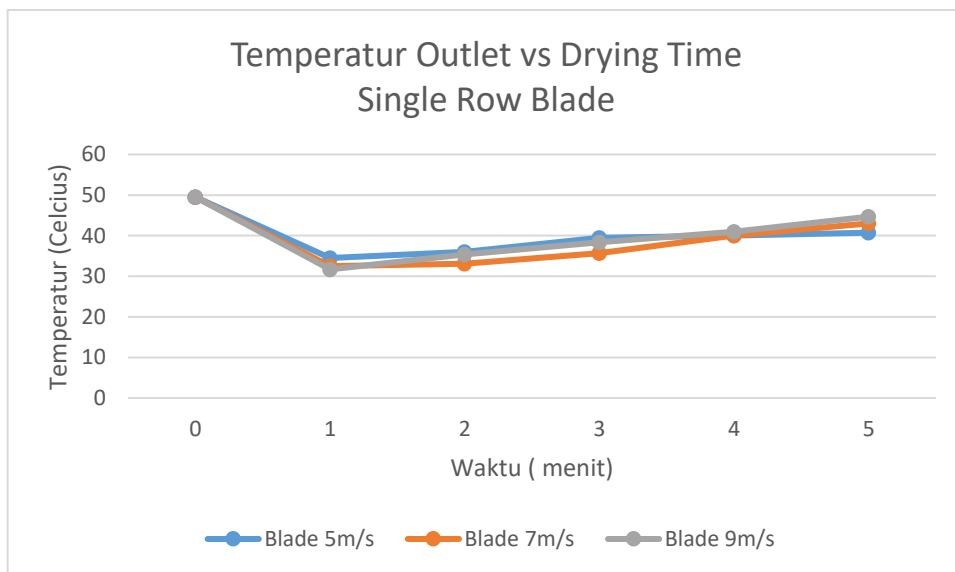
Dari contoh perhitungan yang telah didapatkan di atas, hasil penelitian ditampilkan dalam grafik di bawah ini untuk menganalisa hasil penelitian dari sisi udara pengering dan sisi batubara.

4.2.1 Analisa Grafik Temperatur Udara Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengering

4.2.1.1 Temperatur Udara Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengering *Perforated Plate* dan *Single Row Blade*



Gambar 4. 3 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time *Perforated Plate*



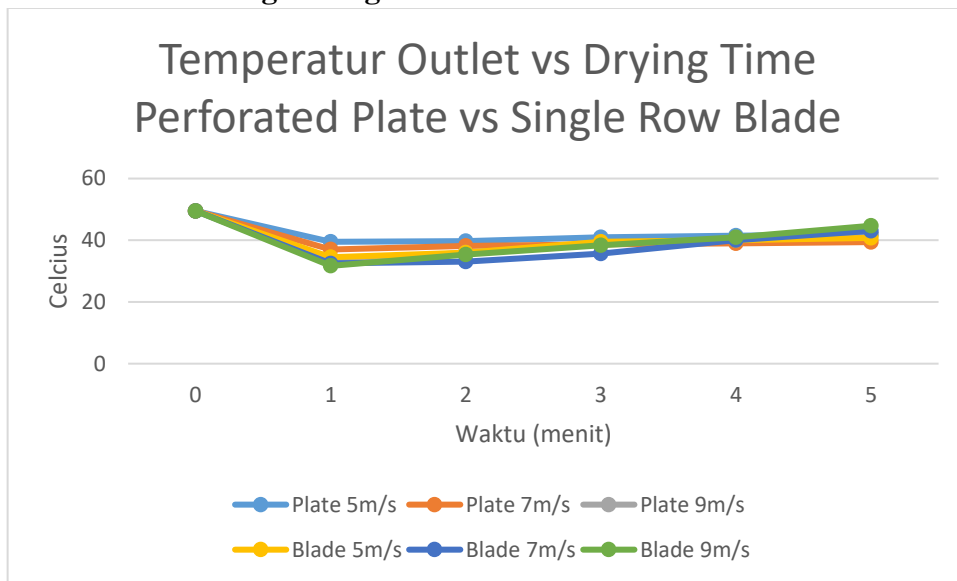
Gambar 4. 4 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time *Single Row Blade*

Pada penelitian ini, dilakukan penggunaan 3 variasi kecepatan udara pengering sebesar 5 m/s, 7 m/s dan 9 m/s dengan 2 jenis *bed* pengeringan yang berbeda yaitu *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm dan *single row blade* dengan sudut *blade* sebesar 20°. Dari 2 grafik di atas, terlihat bahwa nilai temperatur keluar dari udara pengering setelah mengeringkan batubara pada menit pertama cenderung semakin rendah ketika kecepatan udara pengeringnya semakin bertambah untuk penggunaan dua jenis *bed* pengeringan yang berbeda.

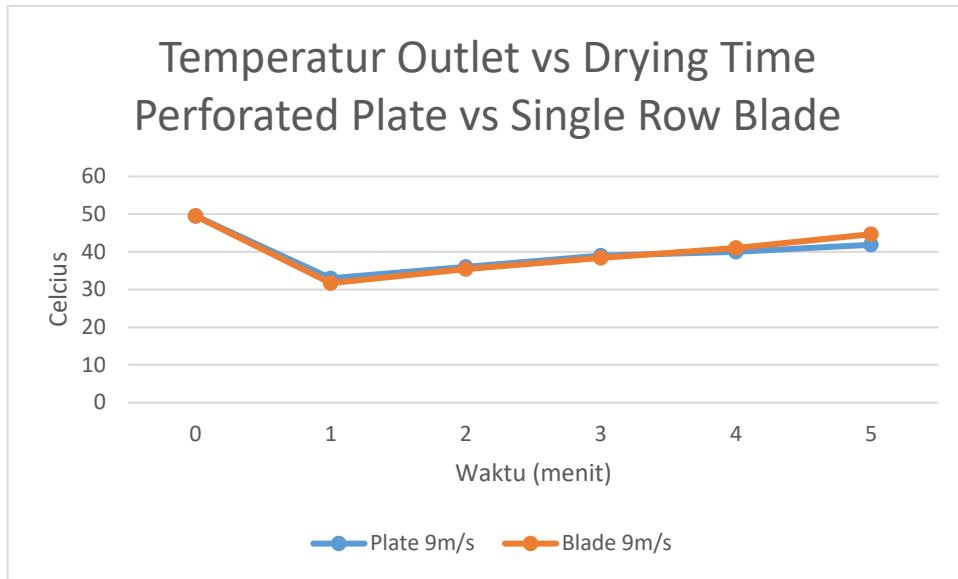
Temperatur keluar udara pengering pada menit pertama tercatat sebesar 39,5°C, 37°C, dan 33°C masing-masing untuk kecepatan 5 m/s, 7 m/s dan 9 m/s pada *perforated plate* dengan diameter 5 mm dan temperatur outlet udara pengering pada menit pertama tercatat

sebesar 34,5°C, 32,5°C, dan 31, 7°C masing-masing untuk kecepatan 5 m/s, 7 m/s dan 9 m/s pada *single row blade* dengan sudut 20°. Kemudian 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°, terlihat bahwa nilai temperatur udara keluar *chamber* yang terendah adalah milik kecepatan 9 m/s. Semakin tinggi kecepatan udara pengering dan ΔT , semakin tinggi pula laju perpindahan panas dan massanya sehingga kandungan air dalam batubara dapat terangkat dengan baik. Maka dari itu, kecepatan 9 m/s dianggap merupakan kecepatan yang paling optimal untuk mengeringkan batubara.

4.2.1.2 Perbandingan Temperetue Udara Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengering Perforated Plate dengan Single Row Blade



Gambar 4. 5 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade

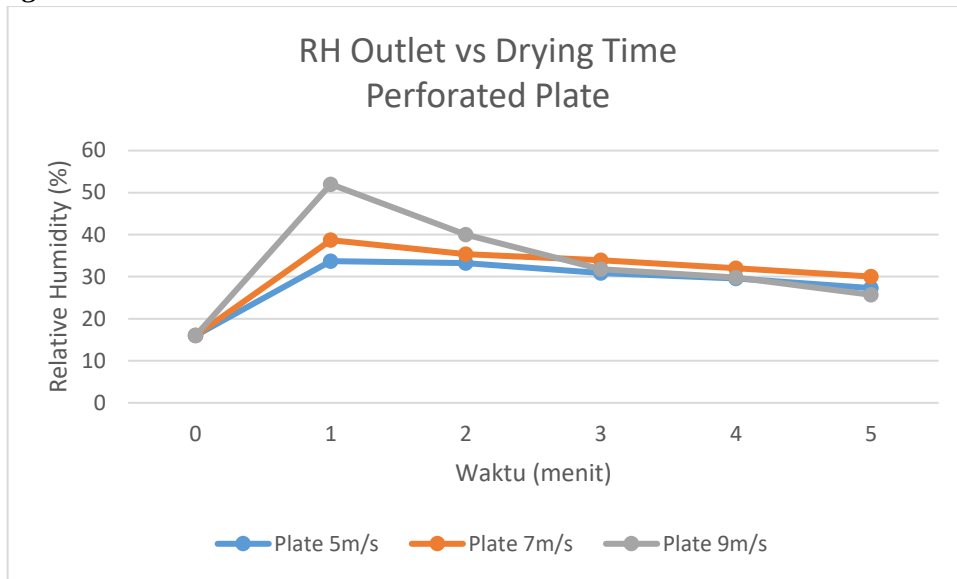


Gambar 4. 6 Grafik Temperatur Udara Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade Kecepatan 9m/s

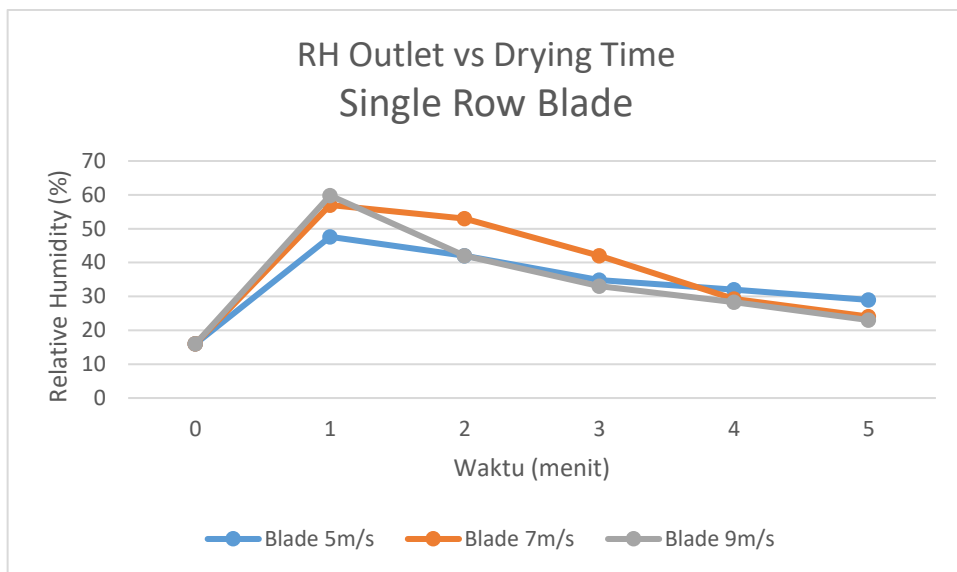
Dari grafik, terlihat bahwa nilai temperatur udara pengering yang keluar dari *chamber* saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° lebih rendah dari nilai temperatur udara pengering yang keluar dari *chamber* saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm sehingga nilai ΔT nya lebih tinggi. Ketika nilai ΔT semakin tinggi, nilai laju perpindahan panas dan massanya juga akan semakin meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan jenis *bed* pengeringan *single row blade* dengan sudut 20° lebih optimal untuk mengeringkan batubara daripada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm. Selain itu, sudut pada *single row blade* menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *reynold number*nya mengalami peningkatan. Peningkatan *Reynold Number* mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa juga mengalami peningkatan. Sehingga, laju perpindahan panas dan massa batubara juga akan semakin besar.

4.2.2 Analisa Grafik *Relative Humidity* Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengereng

4.2.2.1 *Relative Humidity* Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengereng *Perforated Plate* dan *Single Row Blade*



Gambar 4. 7 Grafik *RH Outlet vs Drying Time Perforated Plate*



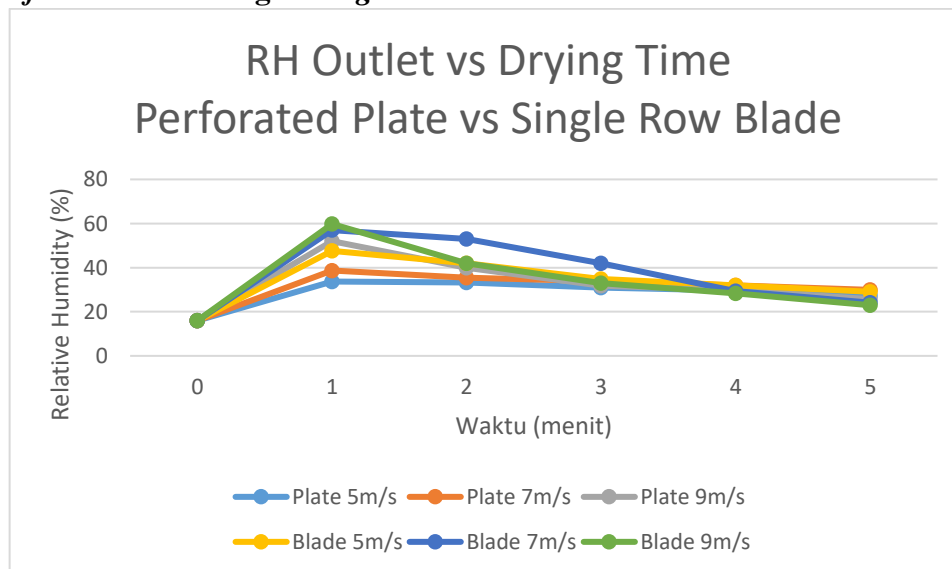
Gambar 4. 8 Grafik *RH Outlet vs Drying Time Single Row Blade*

Pada penelitian ini, dilakukan penggunaan 3 variasi kecepatan udara pengereng sebesar 5 m/s, 7 m/s dan 9 m/s dengan 2 jenis *bed* pengerengan yang berbeda yaitu *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm dan *single row blade* dengan sudut *blade* sebesar 20°. Dari 2 grafik di atas, terlihat bahwa nilai *relative humidity* keluar dari udara pengereng setelah mengeringkan batubara pada menit pertama cenderung semakin tinggi ketika kecepatan udara pengerengnya semakin bertambah untuk penggunaan dua jenis *bed* pengereng yang berbeda. Hal ini dikarenakan *moisture content* dari batubara yang diangkut oleh udara pengereng lebih banyak ketika udara tersebut kecepatannya lebih tinggi sehingga nilai *relative humidity* udara pengereng yang keluar dari *chamber* semakin tinggi. Setelah mengalami kenaikan *relative*

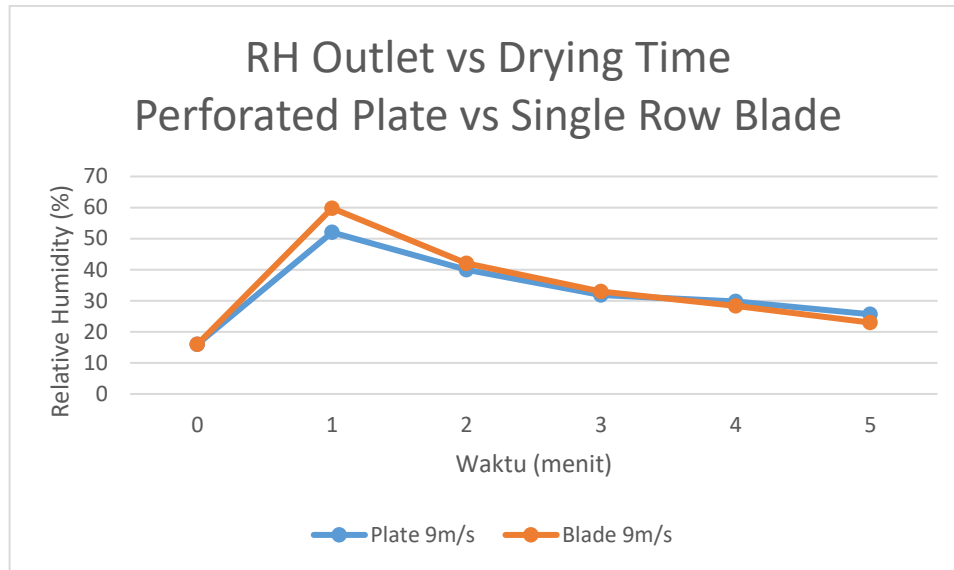
humidity yang cukup tinggi pada menit pertama, udara pengering mengalami penurunan nilai *relative humidity* dikarenakan kandungan air pada batubara sudah mulai berkurang sehingga lebih sedikit air yang berhasil dipindahkan udara pengering dari batubara ke udara yang keluar dari *chamber*.

Relative humidity keluar udara pengering pada menit pertama tercatat sebesar 33,7%, 38,7%, dan 52% masing-masing untuk kecepatan 5 m/s, 7 m/s dan 9 m/s pada *perforated plate* dengan diameter 5 mm dan temperatur outlet udara pengering pada menit pertama tercatat sebesar 47,6%, 57%, dan 59,8% masing-masing untuk kecepatan 5 m/s, 7 m/s dan 9 m/s pada *single row blade* dengan sudut 20°. Kemudian *relative humidity* udara pengering semakin mengalami penurunan hingga mendekati *relative humidity* inlet pada menit ke-5 karena *moisture content* batubara yang dapat dipindahkan udara pengering dari dalam batubara ke permukaan batubara sudah semakin sedikit seiring berjalannya proses pengeringan. Dari grafik penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* d 5 mm, terlihat bahwa nilai *relative humidity* udara keluar *chamber* milik kecepatan 9 m/s paling tinggi dibandingkan kecepatan udara pengering sebesar 5 m/s dan 7 m/s begitu pula saat penggunaan *single row blade* dengan sudut 20°. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan 9 m/s dianggap lebih optimal untuk mengeringkan batubara. Hal ini karena semakin tinggi kecepatan udara pengering, maka akan semakin banyak kandungan air yang dapat dipindahkan dari dalam batubara ke udara pengering.

4.2.2.2 Perbandingan *Relative Humidity* Outlet Fungsi Waktu Sisi Udara Pengering *Perforated Plate* dengan *Single Row Blade*



Gambar 4. 9 Grafik *RH Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade*

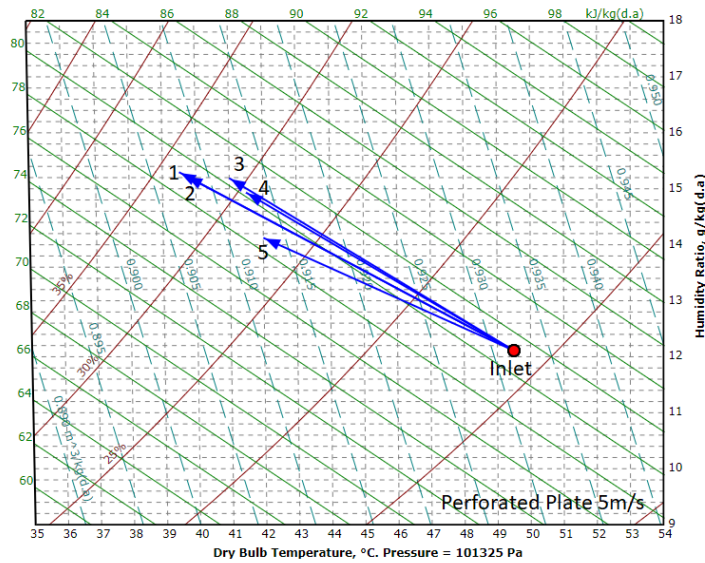


Gambar 4. 10 Grafik RH Outlet vs Drying Time Perforated Plate vs Single Row Blade Kecepatan 9m/s

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 kecepatan 9m/s 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 kecepatan 9m/s 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 kecepatan 9m/s lebih optimal untuk mengeringkan batubara daripada menggunakan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter lubang sebesar 5 mm pada kecepatan yang sama. Selain itu, sudut pada *single row blade* menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *reynold number*nya mengalami peningkatan. Peningkatan *Reynold Number* mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa juga mengalami peningkatan. Sehingga, laju perpindahan panas dan massa batubara juga akan semakin besar.

4.2.3 Analisa Grafik *Psychrometric* Udara Pengering

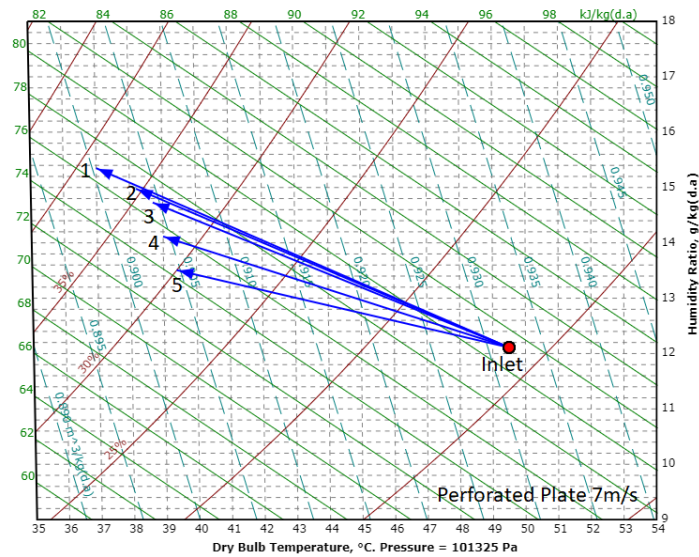
4.2.3.1 Grafik *Psychrometric* Udara Pengering pada *Perforated Plate*



Gambar 4. 11 Grafik *Psychrometric* Udara Pengering pada *Perforated Plate* Kecepatan 5m/s

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*, 15,24 g *water/kg dry air*, 15,17 g *water/kg dry air*, 15,13 g *water/kg dry air*, 14,88 g *water/kg dry air*, dan 14,07 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 temperatur udara pengering akan semakin bertambah dan nilai kelembaban udara akan semakin berkurang.

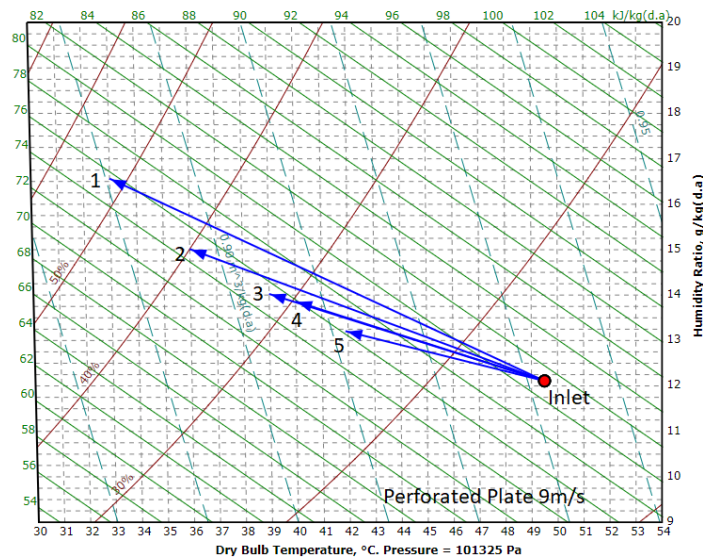
Terlihat pada grafik bahwa penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5 mm pada kecepatan 5m/s tidak terjadi secara drastis. Contohnya pada titik menit pertama dan menit kedua yang memiliki sedikit perbedaan rasio kelembaban. Hal ini dikarenakan kecepatan udara pengering kurang mampu untuk memindahkan banyak kandungan air dari batubara selama proses pengeringan pada menit pertama. Sehingga, penurunan kadar air pada menit selanjutnya tidak terjadi secara drastis.



Gambar 4. 12 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate Kecepatan 7m/s

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.

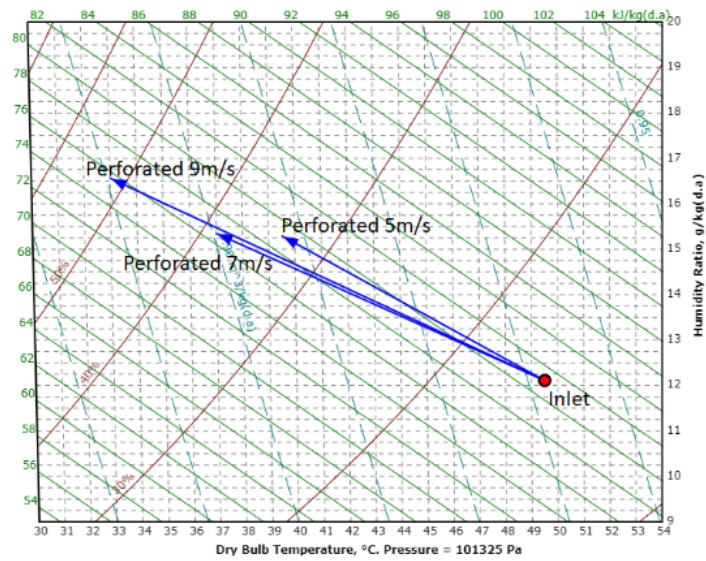
Terlihat pada grafik bahwa penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5 mm pada kecepatan 7m/s lebih terlihat daripada saat penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s. Hal ini dikarenakan kecepatan udara pengering sudah mampu untuk memindahkan banyak kandungan air dari batubara selama proses pengeringan pada menit pertama. Sehingga, penurunan kadar air pada menit selanjutnya dapat lebih terlihat pada grafik psikrometrik tersebut.



Gambar 4. 13 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate Kecepatan 9m/s

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*, 16,44 g *water/kg dry air*, 14,96 g *water/kg dry air*, 14 g *water/kg dry air*, 13,8 g *water/kg dry air*, dan 13,2 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.

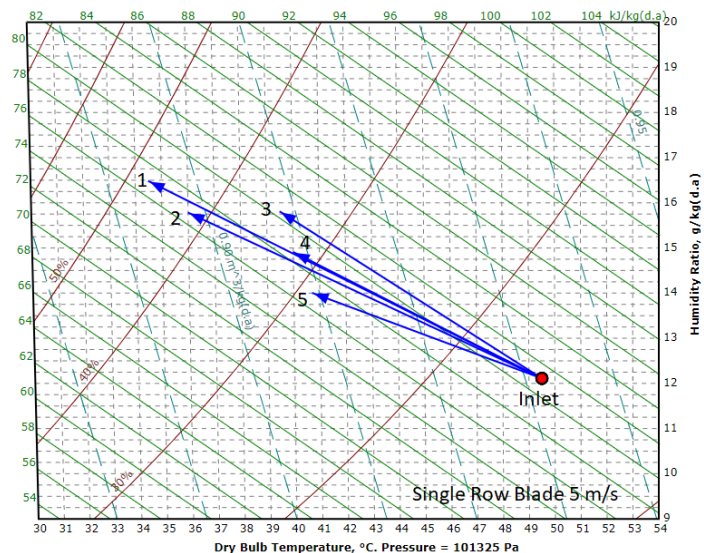
Terlihat pada grafik bahwa penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5 mm pada kecepatan 9m/s terjadi secara drastis. Contohnya pada titik menit pertama dan menit kedua yang memiliki 1,5 g/kg perbedaan rasio kelembaban. Hal ini dikarenakan kecepatan udara pengering mampu untuk memindahkan banyak kandungan air dari batubara selama proses pengeringan pada menit pertama. Sehingga, penurunan kadar air pada menit selanjutnya terjadi secara drastis. Penurunan kandungan air pada udara pengering seiring berjalannya waktu terjadi paling drastis pada variasi kecepatan paling besar yaitu 9m/s.



Gambar 4. 14 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Perforated Plate Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s

Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa nilai rasio kelembaban dari yang terbesar ke yang terkecil pada proses pengeringan menggunakan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm terjadi pada kecepatan udara pengering sebesar 9m/s, 7m/s dan 5m/s. Fenomena ini terjadi karena semakin besar kecepatan udara pengering batubara, semakin besar pula kandungan air yang dapat dipindahkan dari dalam batubara ke udara pengering. Hal ini dibuktikan dari peningkatan nilai *relative humidity* udara *outlet chamber* seiring dengan peningkatan kecepatan udara pengeringnya.

4.2.3.2 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade

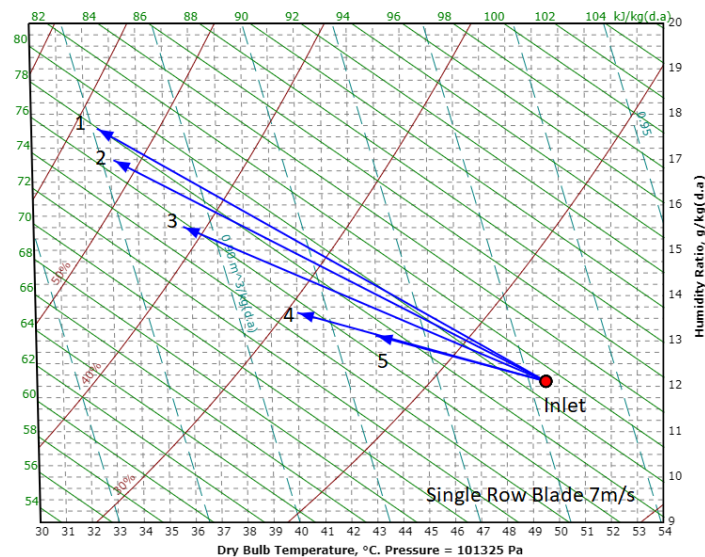


Gambar 4. 15 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Kecepatan 5m/s

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, 16,42 g water/kg dry air, 16,21 g water/kg dry air, 15,75 g water/kg dry air, 14,85g water/kg dry air, dan 13,95 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.

Terlihat pada grafik bahwa penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada kecepatan 5m/s lebih terlihat daripada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm pada kecepatan udara pengering yang sama yaitu sebesar 5m/s dan 7m/s. Fenomena ini terjadi karena udara pengering dengan kecepatan 5m/s 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 kecepatan udara pengering sebesar 5m/s lebih besar daripada nilai *relative humidity* pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm dengan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s.

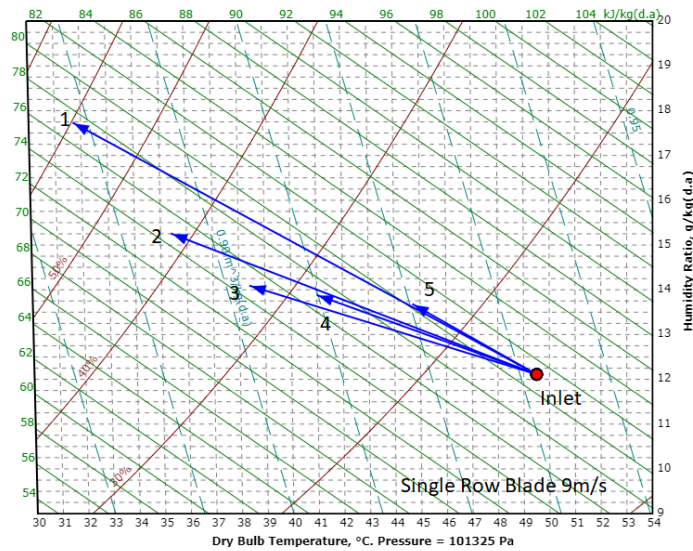


Gambar 4. 16 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Kecepatan 7m/s

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.

Dari grafik di atas, penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada kecepatan 7m/s lebih terlihat daripada saat penggunaan *bed* yang sama dengan kecepatan 5m/s. Selain itu, penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada kecepatan 7m/s juga lebih terlihat daripada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s. Fenomena ini terjadi karena udara pengering dengan kecepatan 7m/s 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 kecepatan udara pengering sebesar 7m/s lebih besar daripada nilai *relative humidity* pada penggunaan *bed* pengeringan yang sama dengan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm dengan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s.

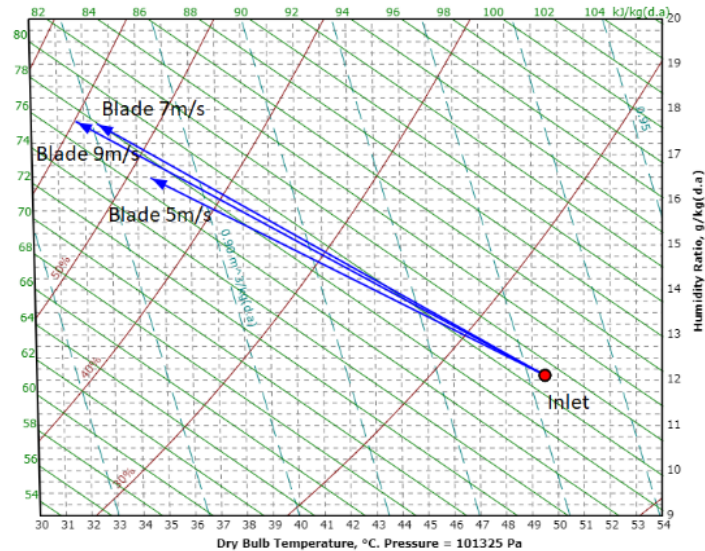


Gambar 4. 17 Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Kecepatan 9m/s

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*, 17,67 g *water/kg dry air*, 15,2 g *water/kg dry air*, 14 g *water/kg dry air*, 13,8 g *water/kg dry air*, dan 13,6 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.

Terlihat pada grafik di atas jika penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada kecepatan 9m/s lebih terlihat daripada saat penggunaan *bed* yang sama dengan kecepatan 7m/s dan 5m/s. Selain itu, penurunan rasio kelembaban pada penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada kecepatan 9m/s juga lebih terlihat daripada saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s. Fenomena ini terjadi karena udara pengering dengan kecepatan 9m/s 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 kecepatan udara pengering sebesar 9m/s lebih besar daripada nilai *relative humidity*

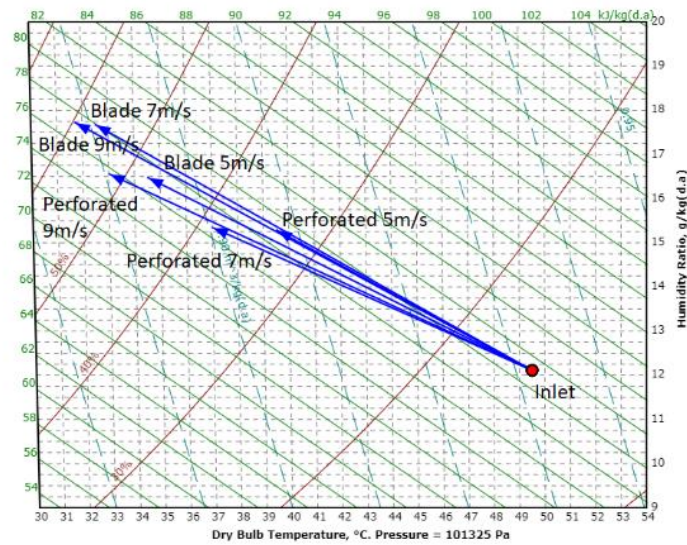
pada penggunaan *bed* pengeringan yang sama dengan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s serta saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm dengan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s



Gambar 4. 18 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada Single Row Blade Sudut 20° pada Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s

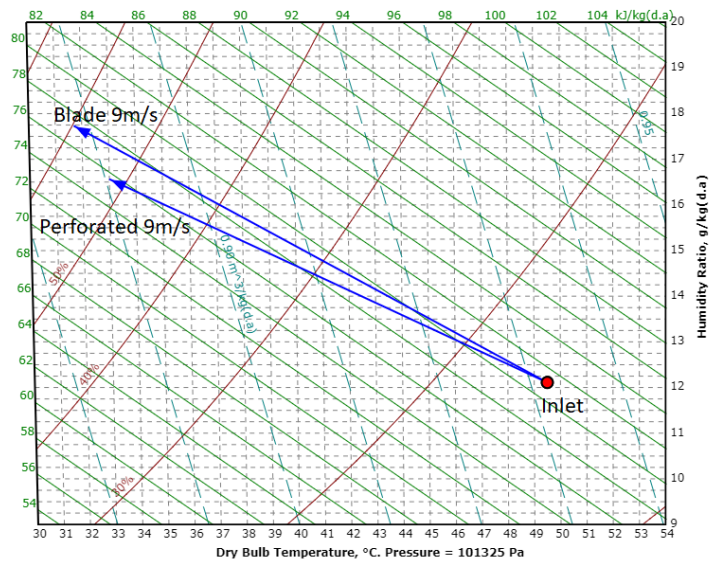
Dari grafik psikrometrik di atas, terlihat bahwa nilai rasio kelembaban terbesar pada *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° ada pada eksperimen dengan variasi kecepatan sebesar 9m/s diikuti dengan variasi kecepatan sebesar 7m/s dan 5m/s. Fenomena ini terjadi karena semakin besar kecepatan udara pengering batubara, semakin besar pula kandungan air yang dapat dipindahkan dari dalam batubara ke udara pengering. Hal ini dibuktikan dari peningkatan nilai *relative humidity* udara *outlet chamber* seiring dengan peningkatan kecepatan udara pengeringnya.

4.2.3.3 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada *Perforated Plate* vs *Single Row Blade* dengan Sudut 20°



Gambar 4. 19 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada *Perforated Plate* vs *Single Row Blade* dengan Sudut 20°

Dari grafik psikrometrik di atas terlihat bahwa urutan jenis *bed* pengeringan dan kecepatan udara pengering dari yang kurang optimal hingga paling optimal adalah *perforated plate* kecepatan 5m/s, 7m/s, *single row blade* kecepatan 5m/s, *perforated plate* kecepatan 9m/s, *single row blade* kecepatan 7m/s dan 9m/s. Hal ini dapat dilihat dari nilai rasio kelembaban masing-masing variasi. Semakin tinggi nilai rasio kelembaban udara pengering setelah melewati *bed* pengeringan yang digunakan, maka akan semakin optimal variasi tersebut dalam memindahkan kandungan air dari dalam batubara ke udara pengering.

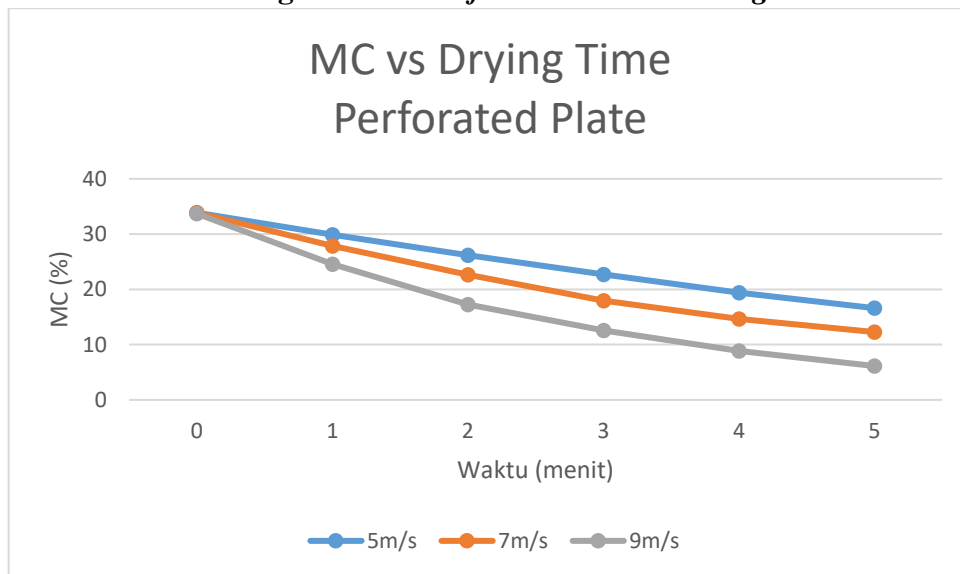


Gambar 4. 20 Perbandingan Grafik Psychrometric Udara Pengering pada *Perforated Plate* vs *Single Row Blade* dengan Sudut 20° Kecepatan 9m/s

Dari grafik di atas, terlihat bahwa penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° dengan kecepatan 9m/s memiliki nilai rasio kelembaban udara pengering yang lebih tinggi daripada penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm pada kecepatan yang sama di menit pertama proses pengeringan. Hal ini berarti bahwa penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada kecepatan udara pengering 9m/s adalah yang paling optimal untuk mengeringkan batubara. Fenomena ini dapat terjadi karena nilai *relative humidity* udara *outlet chamber* pada eksperimen dengan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° pada kecepatan udara pengering 9m/s adalah yang paling tinggi daripada nilai pada eksperimen dengan variasi lainnya.

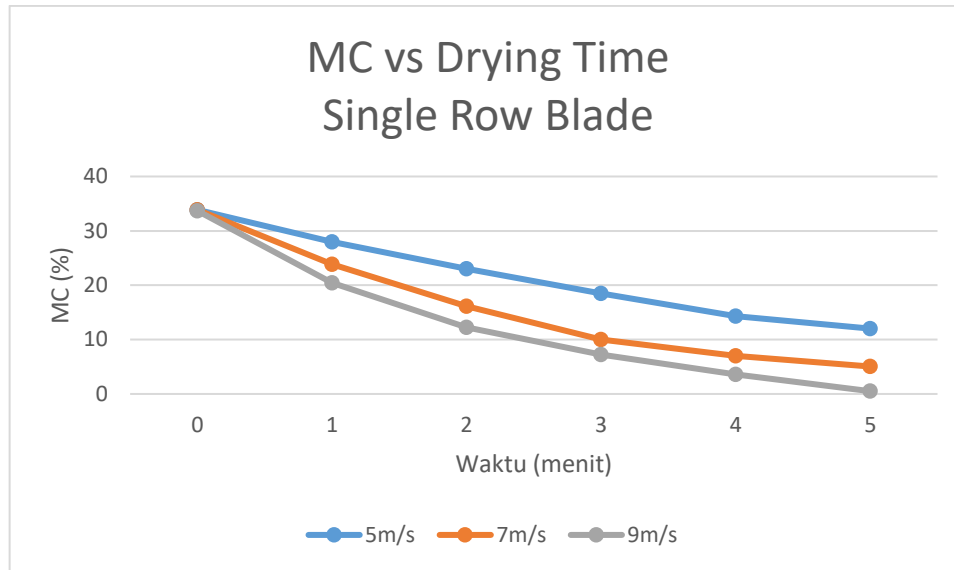
4.2.4 Analisa Grafik *Moisture Content* Fungsi Waktu Sisi Batubara

4.2.4.1 *Moisture Content* Fungsi Waktu *Perforated Plate* dan *Single Row Blade*



Gambar 4. 21 Grafik *Moisture Content* *Perforated Plate* Diameter 5mm Kecepatan 5m/s , 7m/s , dan 9m/s

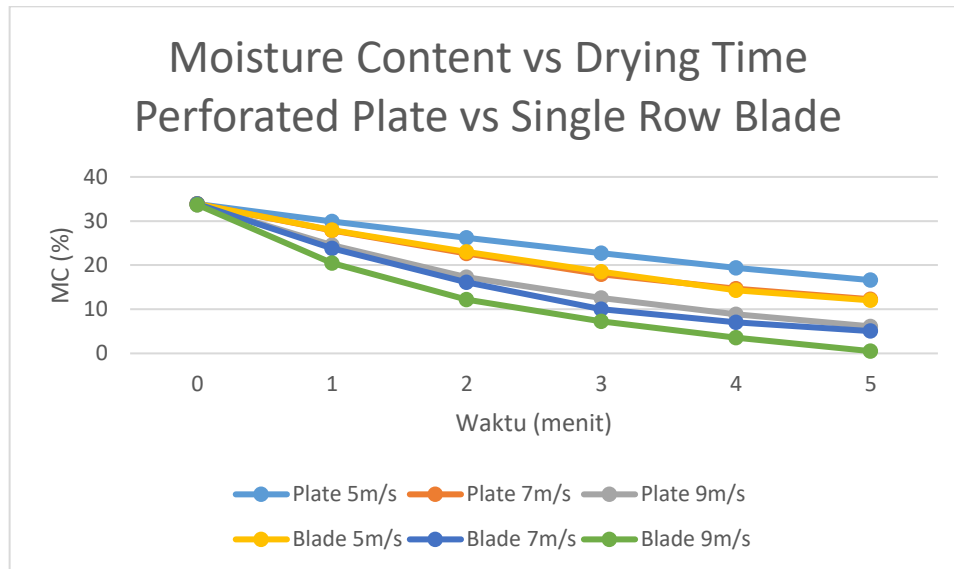
Nilai *moisture content* batubara didapatkan dengan pembagian antara pengurangan massa basah batubara dengan massa kering batubara tersebut setelah dikeringkan dengan *fluidized bed dryer* dan oven terhadap massa basah batubara itu sendiri. Asumsi semua nilai *moisture content* awal dari batubara pada eksperimen ini adalah sebesar 34% . Perubahan nilai *moisture content* batubara di menit pertama pengeringan saat penggunaan *perforated plate* dengan diameter 5mm dengan kecepatan 5m/s , 7m/s , dan 9m/s berturut-turut pada eksperimen ini adalah sebesar 29% , 28% , dan 24% . Grafik di atas menunjukkan bahwa penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s pada *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm dapat menurunkan cukup banyak *moisture content* batubara dengan cepat. Hal ini dikarenakan semakin cepat udara pengering yang digunakan, semakin banyak kandungan air yang dapat dipindahkan dari batubara ke udara pengering selama proses pengeringan.



Gambar 4. 22 Grafik Moisture Content Single Row Blade dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s

Nilai *moisture content* batubara didapatkan dengan pembagian antara pengurangan massa basah batubara dengan massa kering batubara tersebut setelah dikeringkan dengan *fluidized bed dryer* dan oven terhadap massa basah batubara itu sendiri. Asumsi semua nilai *moisture content* awal dari batubara pada eksperimen ini adalah sebesar 34%. Perubahan nilai *moisture content* batubara di menit pertama pengeringan saat penggunaan *single row blade* sudut 20° dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut pada eksperimen ini adalah sebesar 28%, 24%, dan 20%. Grafik di atas menunjukkan bahwa penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s pada *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° dapat menurunkan cukup banyak *moisture content* batubara dengan cepat. Hal ini dikarenakan semakin cepat udara pengering yang digunakan, semakin banyak kandungan air yang dapat dipindahkan dari batubara ke udara pengering selama proses pengeringan.

4.2.4.2 Perbandingan *Moisture Content* Fungsi Waktu *Perforated Plate* vs *Single Row Blade*

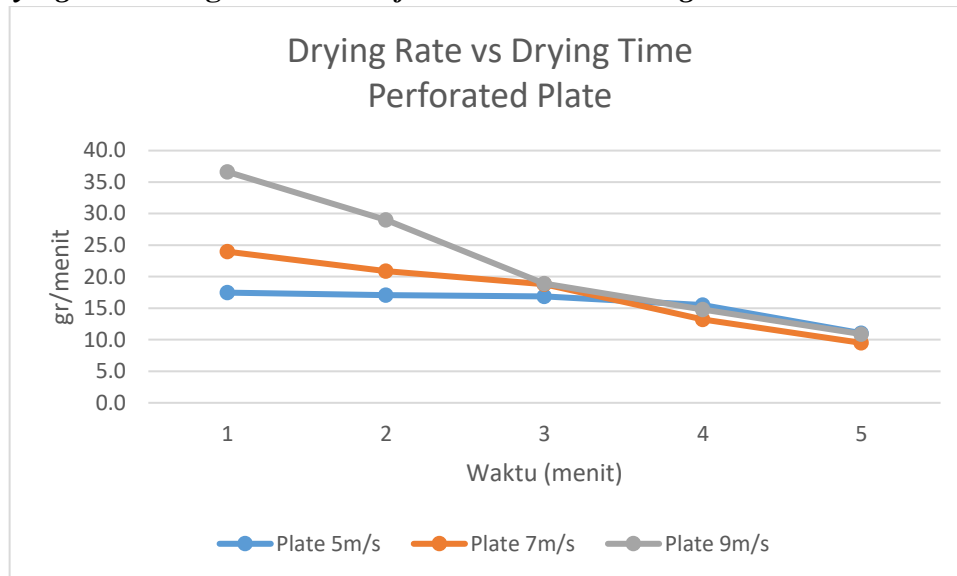


Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan *Moisture Content* *Perforated Plate* Diameter 5mm vs *Single Row Blade* dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s

Dari grafik di atas, terlihat bahwa urutan penurunan nilai *moisture content* batubara pada menit pertama pengeringan dari yang paling sedikit hingga paling banyak adalah *perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 5m/s dan 7m/s, *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 5m/s, *perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 9m/s, *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 7m/s dan 9m/s. 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. Penurunan nilai *moisture content* batubara terbanyak ada pada penggunaan *bed* jenis *single row blade* dengan sudut 20° dengan kecepatan sebesar 9m/s. Fenomena ini terjadi karena kecepatan udara pengering sebesar 9m/s memiliki nilai bilangan *Reynold* yang paling besar dan sudut pada *single row blade* menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *reynold number*nya mengalami peningkatan. Peningkatan *Reynold Number* mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas dan massa juga mengalami peningkatan. Sehingga, laju perpindahan massa batubara akan semakin besar. Hal ini dibuktikan dengan nilai *relative humidity* udara *outlet chamber* yang lebih tinggi saat pengeringan menggunakan *single row blade* pada kecepatan udara pengering sebesar 9m/s.

4.2.5 Analisa Grafik *Drying Rate* Fungsi Waktu *Perforated Plate* dan *Single Row Blade Sisi Batubara*

4.2.5.1 *Drying Rate* Fungsi Waktu *Perforated Plate* dan *Single Row Blade*

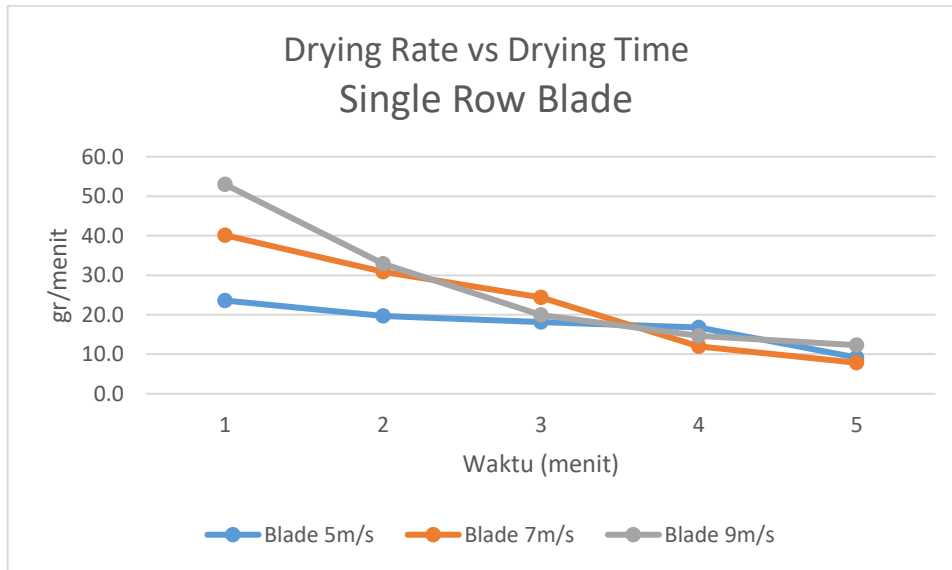


Gambar 4. 24 Grafik *Drying Rate* *Perforated Plate* dengan Diameter 5mm Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s

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 kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 17,5 gr/menit, 24 gr/menit, dan 36,6 gr/menit. Selanjutnya titik kedua merupakan *drying rate* batubara pada menit kedua proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 17,1 gr/menit, 20,9 gr/menit, 29 gr/menit. Titik 3 merupakan *drying rate* batubara pada menit ketiga proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 16,9 gr/menit, 18,8 gr/menit, 18,9 gr/menit. Titik 4 merupakan *drying rate* batubara pada menit keempat proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 15,5 gr/menit, 13,2 gr/menit, dan 14,8 gr/menit. Dan yang terakhir titik 5 merupakan *drying rate* batubara pada menit kelima proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 11 gr/menit, 9,5 gr/menit, dan 10,9 gr/menit.

Pada penggunaan *perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 5m/s, nilai *drying rate* terbesar ada pada menit pertama yaitu sebesar 17,5 gr/menit. Pada penggunaan *perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s, nilai *drying rate* terbesar ada pada menit pertama yaitu sebesar 24 gr/menit. Pada penggunaan *perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 9m/s, nilai *drying rate* terbesar ada pada menit pertama yaitu sebesar 36,6 gr/menit. Maka dari itu kecepatan paling optimal dalam proses pengeringan batubara dengan jenis *bed perforated plate* dengan diameter 5mm adalah 9m/s. Fenomena ini terjadi karena kandungan air pada batubara yang dapat dipindahkan ke udara pengering akan semakin besar seiring peningkatan

kecepatan udara pengeringnya. Hal ini dibuktikan oleh nilai *moisture content* batubara di awal pengeringan yang semakin rendah seiring bertambahnya kecepatan udara pengering.

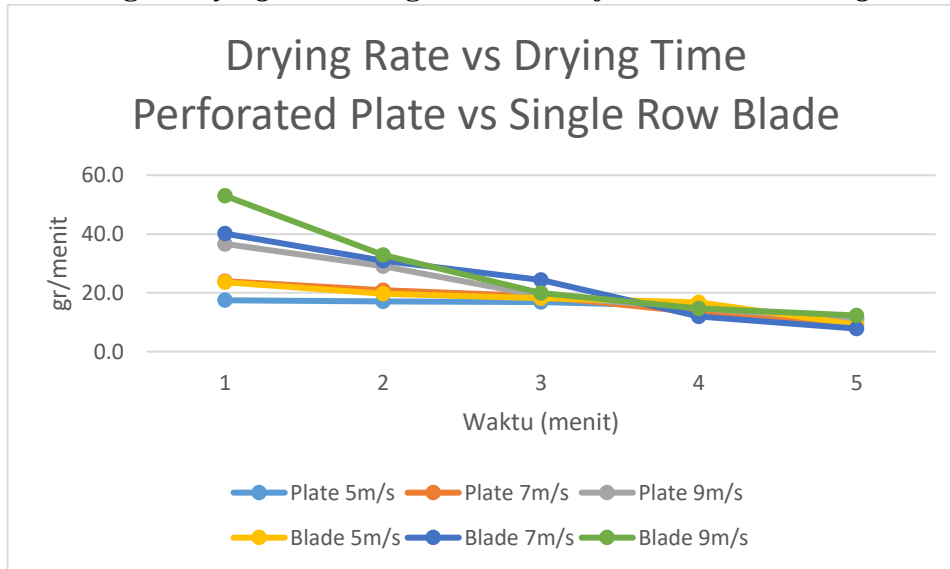


Gambar 4. 25 Grafik Drying Rate Single Row Blade dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s

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 *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 23,6 gr/menit, 40,1 gr/menit, dan 53 gr/menit. Selanjutnya titik kedua merupakan *drying rate* batubara pada menit kedua proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 19,7 gr/menit, 30,9 gr/menit, 32,9 gr/menit. Titik 3 merupakan *drying rate* batubara pada menit ketiga proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 18,2 gr/menit, 24,4 gr/menit, 19,2 gr/menit. Titik 4 merupakan *drying rate* batubara pada menit keempat proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 16,7 gr/menit, 12 gr/menit, dan 14,7 gr/menit. Dan yang terakhir titik 5 merupakan *drying rate* batubara pada menit kelima proses pengeringan dengan kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu sebesar 9,2 gr/menit, 7,8 gr/menit, dan 12,3 gr/menit.

Pada penggunaan *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 5m/s, nilai *drying rate* terbesar ada pada menit pertama yaitu sebesar 23,6 gr/menit. Pada penggunaan *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 7m/s, nilai *drying rate* terbesar ada pada menit pertama yaitu sebesar 40,1 gr/menit. Pada penggunaan *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 9m/s, nilai *drying rate* terbesar ada pada menit pertama yaitu sebesar 53 gr/menit. Maka dari itu kecepatan paling optimal dalam proses pengeringan batubara dengan jenis *bed single row blade* dengan sudut 20° adalah 9m/s. Fenomena ini terjadi karena kandungan air pada batubara yang dapat dipindahkan ke udara pengering akan semakin besar seiring peningkatan kecepatan udara pengeringnya. Hal ini dibuktikan oleh nilai *moisture content* batubara di awal pengeringan yang semakin rendah seiring bertambahnya kecepatan udara pengering.

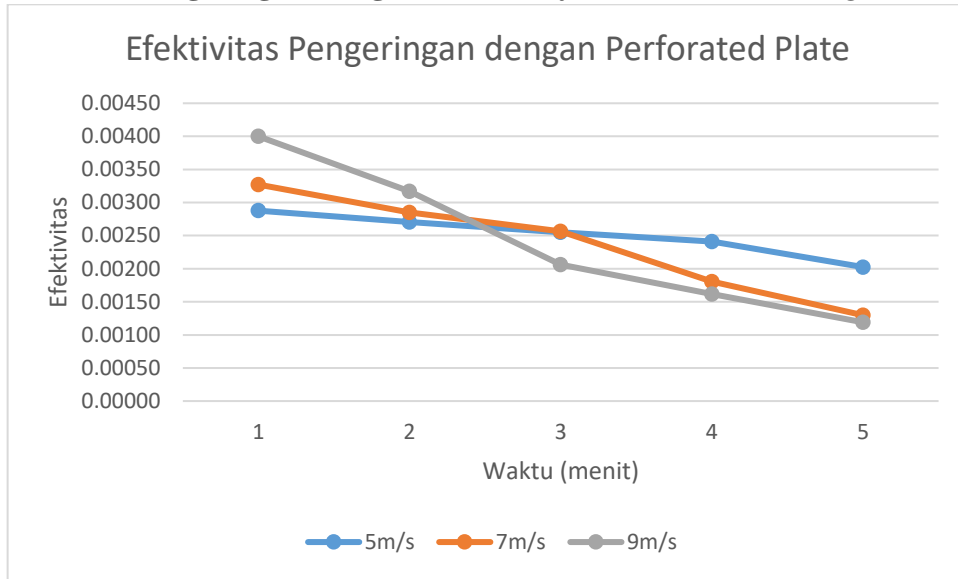
4.2.5.2 Perbandingan *Drying Rate* Fungsi Waktu *Perforated Plate* vs *Single Row Blade*



Gambar 4. 26 Grafik Perbandingan *Drying Rate* *Perforated Plate* dengan Diameter 5mm vs *Single Row Blade* dengan Sudut 20° Kecepatan 5m/s, 7m/s, dan 9m/s

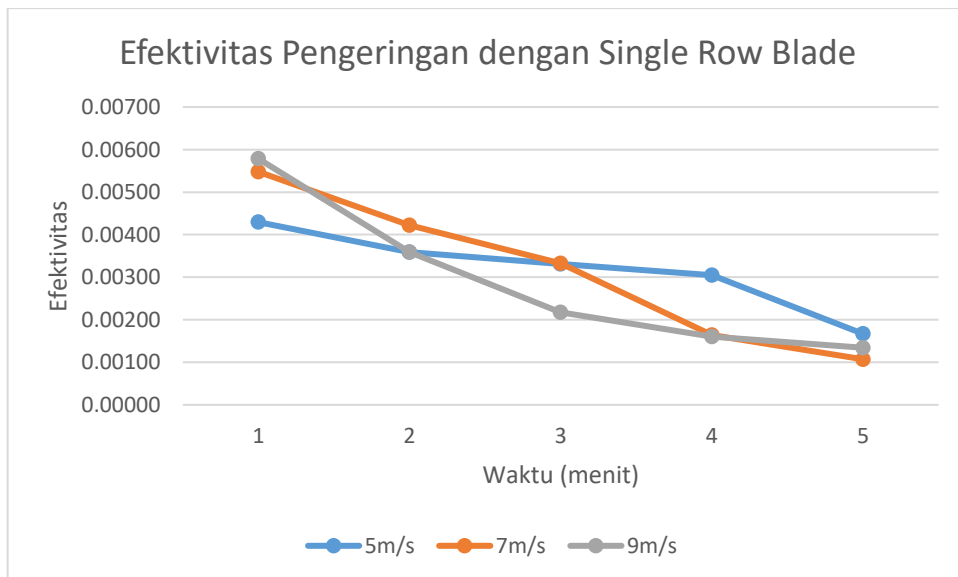
Dari grafik di atas, terlihat bahwa urutan nilai *drying rate* tertinggi ke terendah dari 6 variasi pada eksperimen ini adalah *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 9m/s dan 7m/s, *perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 9m/s, *single row blade* dengan sudut 20° kecepatan 5m/s, *perforated plate* dengan diameter 5mm kecepatan 7m/s dan 5m/s. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan *bed single row blade* dengan sudut 20° dengan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s merupakan yang paling optimal dalam mengeringkan kandungan air di dalam batubara. Fenomena ini terjadi karena kecepatan udara pengering sebesar 9m/s memiliki nilai bilangan *Reynold* yang paling besar dan sudut pada *single row blade* menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *reynold number*nya mengalami peningkatan. Peningkatan *Reynold Number* mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa juga mengalami peningkatan. Sehingga, laju perpindahan massa batubara akan semakin besar. Hal ini dibuktikan dengan nilai *moisture content* pada batubara yang lebih rendah saat pengeringan menggunakan *single row blade* pada kecepatan udara pengering sebesar 9m/s.

4.2.6 Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap Efektivitas Pengeringan
4.2.6.1 Efektivitas Pengeringan Fungsi Waktu *Perforated Plate* dan *Single Row Blade*



Gambar 4. 27 Grafik Efektivitas Pengeringan dengan Perforated Plate

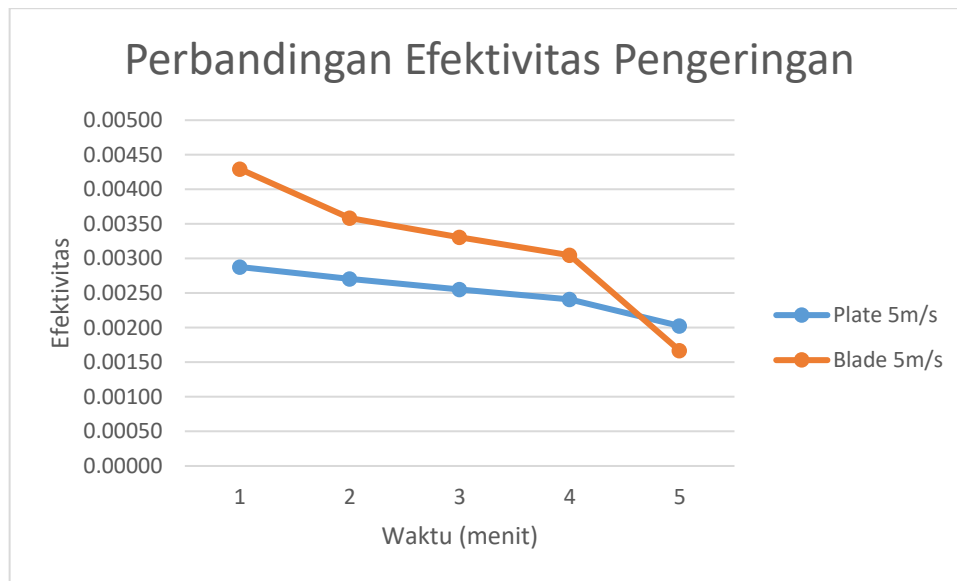
Nilai efektivitas pengeringan didapatkan melalui rasio massa air batubara yang dapat dipindahkan ke udara pengering dan massa udara pengering itu sendiri. Semakin cepat aliran udara pengering, semakin besar massa udara pengering tersebut. Dari Gambar 4.27 di atas, terlihat bahwa pada 2 menit awal saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm, efektivitas pengeringan tertinggi terjadi saat penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s. Selanjutnya efektivitas pengeringan tertinggi pada menit ketiga adalah ketika penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 7m/s dan untuk 2 menit terakhir, efektivitas pengeringan paling tinggi terjadi ketika penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s.



Gambar 4. 28 Grafik Efektivitas Pengeringan dengan Single Row Blade

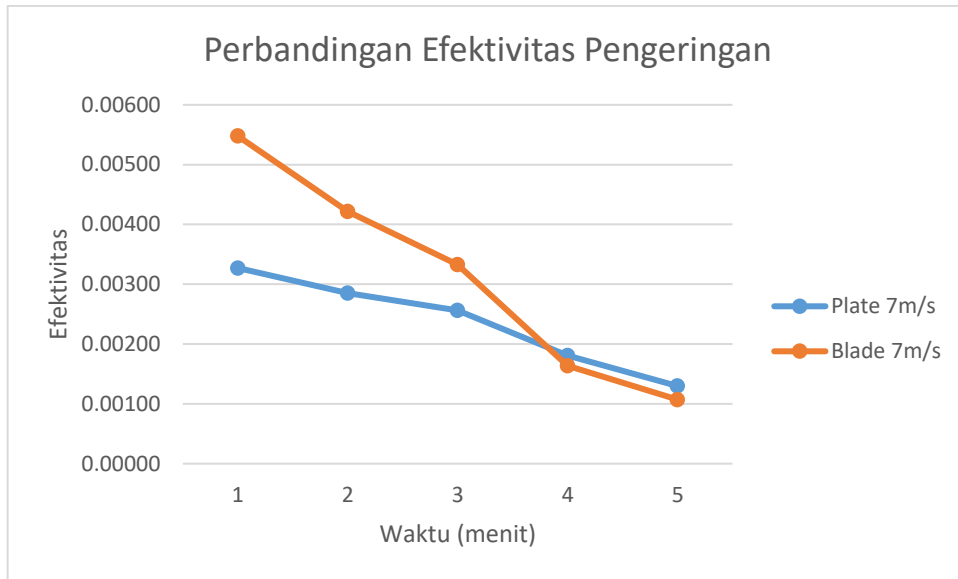
Dari Gambar 4.28 terlihat bahwa nilai efektivitas tertinggi saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° ada pada menit pertama proses pengeringan dengan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s. Pada menit selanjutnya, terlihat bahwa penggunaan kecepatan udara pengering maksimum justru menyebabkan nilai efektivitas menjadi lebih rendah dari 2 kecepatan lainnya sehingga nilai efektivitas pengeringan tertinggi pada menit kedua hingga ketiga diperoleh saat penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 7m/s. Selanjutnya, pada menit keempat dan kelima terlihat bahwa penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s justru mengakibatkan nilai efektivitasnya lebih tinggi dari 2 kecepatan lainnya.

4.2.6.2 Perbandingan Efektivitas Pengeringan Fungsi Waktu *Perforated Plate* vs *Single Row Blade*



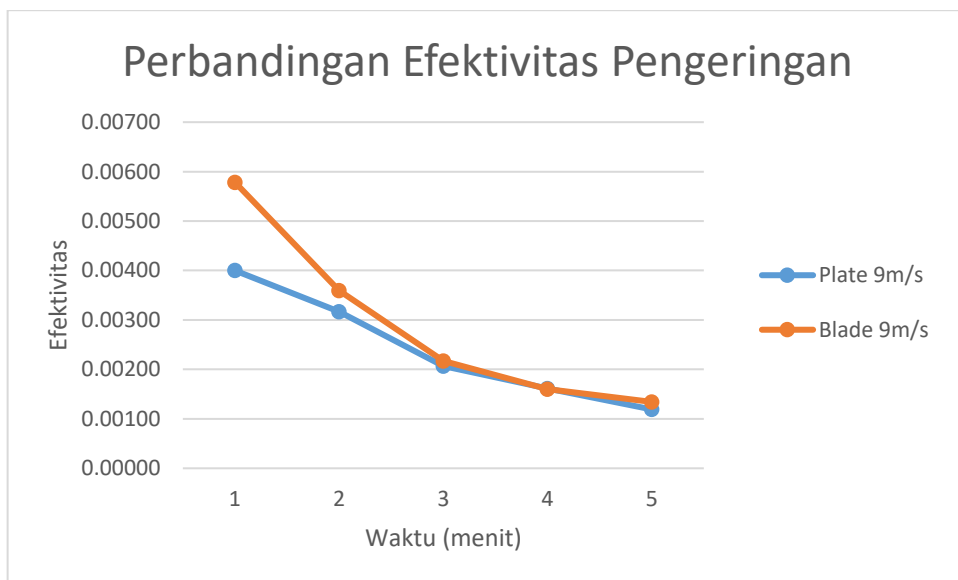
Gambar 4. 29 Grafik Perbandingan Efektivitas Pengeringan dengan Kecepatan Udara Pengering 5m/s

Dari Gambar 4.29 di atas, terlihat bahwa nilai efektivitas pengeringan saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° lebih tinggi daripada saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s. Terlihat pula dari gambar tersebut bahwa di menit kelima, efektivitas pengeringan saat menggunakan *single row blade* lebih rendah dari pada saat penggunaan *perforated plate*.



Gambar 4. 30 Grafik Perbandingan Efektivitas Pengeringan dengan Kecepatan Udara Pengereng 7m/s

Dari Gambar 4.30 di atas, terlihat bahwa nilai efektivitas pengeringan saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° lebih tinggi daripada saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm pada kecepatan udara pengereng sebesar 7m/s. Terlihat pula dari gambar tersebut bahwa di menit keempat dan kelima, efektivitas pengeringan saat menggunakan *single row blade* lebih rendah dari pada saat penggunaan *perforated plate*.

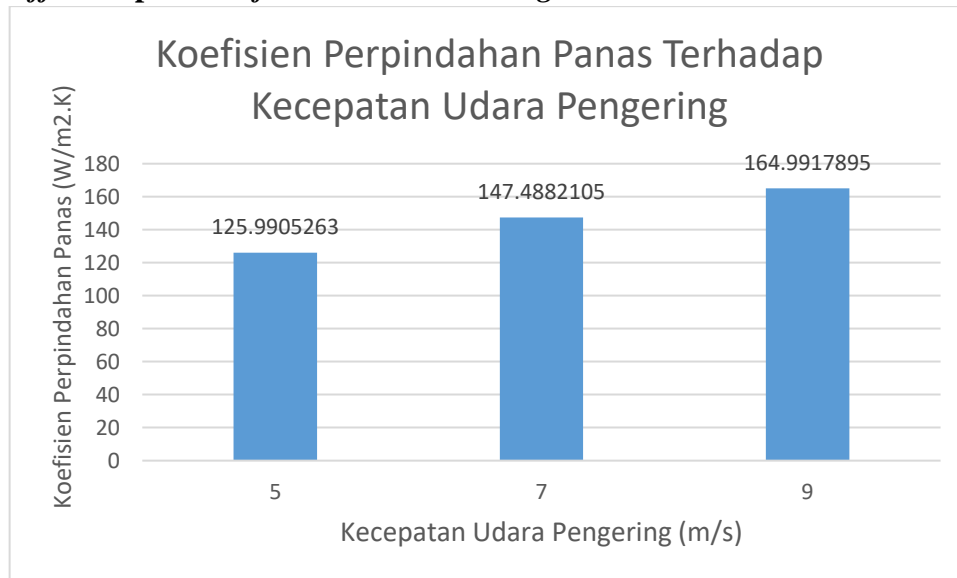


Gambar 4. 31 Grafik Perbandingan Efektivitas Pengeringan dengan Kecepatan Udara Pengereng 9m/s

Dari Gambar 4.31 di atas, terlihat bahwa nilai efektivitas pengeringan saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* dengan sudut 20° lebih tinggi daripada saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *perforated plate* dengan diameter 5mm pada kecepatan udara pengereng

sebesar 9m/s. Terlihat pula dari gambar tersebut bahwa di menit kelima, efektivitas pengeringan saat menggunakan *single row blade* lebih rendah dari pada saat penggunaan *perforated plate*.

4.2.7 Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap *Heat Transfer Coefficient* pada *Perforated Plate* dan *Single Row Blade*



Gambar 4. 32 Grafik heat transfer coefficient fungsi kecepatan udara pengering pada *perforated plate* diameter 5 mm dan *single row blade* sudut 20°

Nilai koefisien perpindahan panas dari grafik di atas didapatkan melalui *properties* saat *drying bed* belum dipasang pada *drying chamber* sehingga untuk dua jenis *bed* pengeringan nilainya akan sama. Dari grafik pada Gambar 4.32, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan panas pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut bernilai 125,99 W/m²K, 147,49 W/m²K, dan 164,99 W/m²K. Terlihat bahwa trend nilai koefisien perpindahan panas pada Gambar 4.32 akan mengalami kenaikan ketika kecepatan udara pengeringnya juga mengalami kenaikan. Hal ini sesuai dengan teori dimana nilai Reynold Number akan semakin besar ketika kecepatan udara pengering juga semakin membesar. Bertambahnya nilai Reynold number ini juga akan mengakibatkan nilai Nusselt number semakin bertambah sehingga nilai koefisien perpindahan panas juga akan semakin bertambah seiring meningkatnya kecepatan udara pengering.

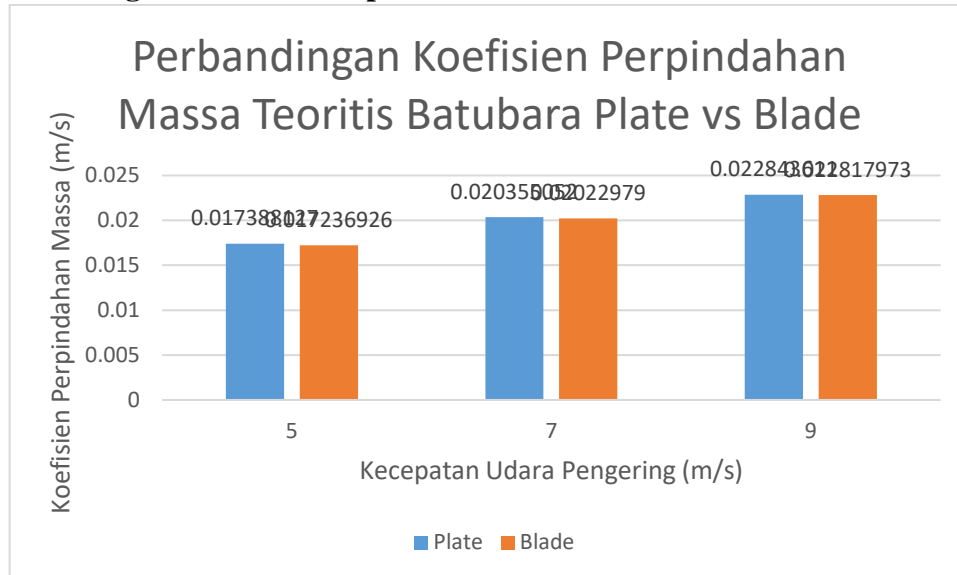
Dari grafik pada Gambar 4.32, nilai koefisien perpindahan panas pada penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s terlihat paling besar dibandingkan dengan penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar kecepatan maka nilai koefisien perpindahan panas juga akan semakin besar. Ketika nilai koefisien perpindahan panas semakin meningkat, maka laju perpindahan panasnya juga akan semakin meningkat.

4.2.8 Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap *Mass Transfer Coefficient* pada *Perforated Plate* dan *Single Row Blade*

Pada proses pengeringan ini selain terjadi peristiwa perpindahan panas, terjadi pula peristiwa perpindahan massa. Massa yang berpindah merupakan massa air yang terkandung dalam batubara. Kandungan air ini akan berpindah ke udara pengering selama proses

pengeringan batubara berlangsung. Faktor yang memengaruhi laju perpindahan massa suatu benda adalah koefisien perpindahan massa benda tersebut. Berikut ini merupakan perbandingan nilai koefisien perpindahan massa batubara fungsi kecepatan udara pengering pada *perforated plate* diameter 5 mm dan *single row blade* sudut 20° secara teoritis dan aktual.

4.2.8.1 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis Batubara



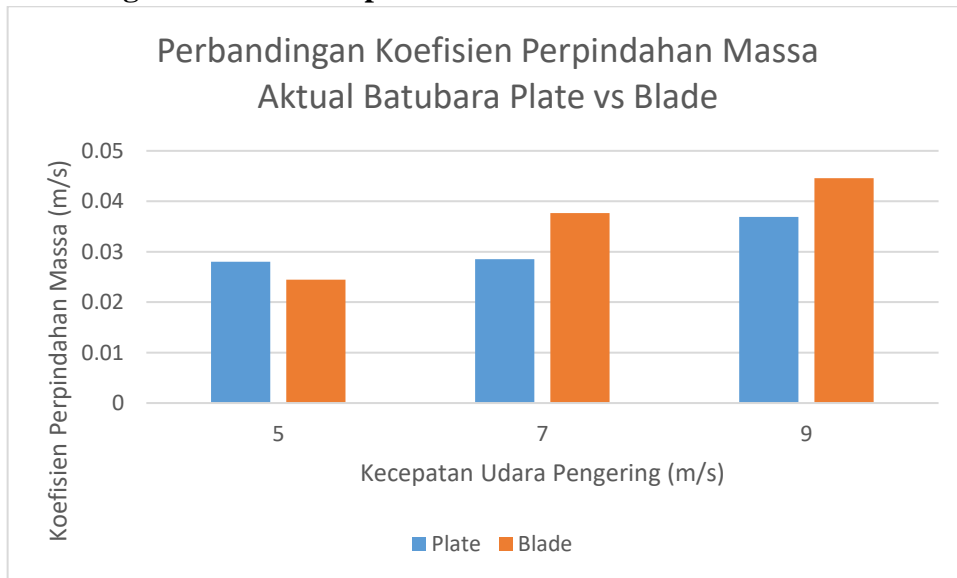
Gambar 4. 33 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis Batubara fungsi kecepatan udara pengering pada *perforated plate* diameter 5 mm dan *single row blade* sudut 20°

Nilai koefisien perpindahan massa dari grafik di atas didapatkan melalui *properties* saat *drying bed* belum dipasang pada *drying chamber* sehingga untuk dua jenis *bed* pengeringan nilainya akan sama. Dari grafik pada Gambar 4.33, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan massa pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s pada penggunaan *bed* jenis *perforated plate* diameter 5mm berturut-turut bernilai 0,017388 m/s, 0,020355 m/s, dan 0,022844 m/s. Selanjutnya, untuk nilai koefisien perpindahan massa pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s pada penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° berturut-turut bernilai 0,017237 m/s, 0,02023 m/s, dan 0,022818 m/s. *Trendline* pada grafik tersebut menunjukkan kenaikan nilai koefisien perpindahan massa seiring meningkatnya nilai kecepatan udara pengering yang digunakan dalam proses pengeringan. Semakin besar nilai koefisien perpindahan massa suatu benda, maka akan semakin besar pula laju perpindahan massa dari benda tersebut. Koefisien perpindahan massa ini dipengaruhi oleh nilai koefisien perpindahan panas sehingga nilai koefisien perpindahan massa akan berbanding lurus dengan nilai koefisien perpindahan panas.

Dari grafik sebelumnya yaitu pada Gambar 4.32 terlihat bahwa semakin tinggi nilai kecepatan udara pengering yang digunakan, semakin tinggi pula nilai koefisien perpindahan panasnya. Karena perubahan nilai koefisien perpindahan panas berbanding lurus dengan perubahan nilai koefisien perpindahan massa, maka terlihat pada Gambar 4.33 bahwa nilai koefisien perpindahan massa juga mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai kecepatan udara pengering yang digunakan selama proses pengeringan batubara berlangsung.

Dari grafik pada Gambar 4.33, nilai koefisien perpindahan massa pada penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s terlihat paling besar dibandingkan dengan penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s. Hal ini sesuai dengan teori bahwa nilai koefisien perpindahan panas dan massa akan semakin besar ketika kecepatan udara pengering semakin besar pula. Ketika nilai koefisien perpindahan panas dan massa semakin meningkat, maka laju perpindahan massanya juga akan semakin meningkat.

4.2.8.2 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Aktual Batubara



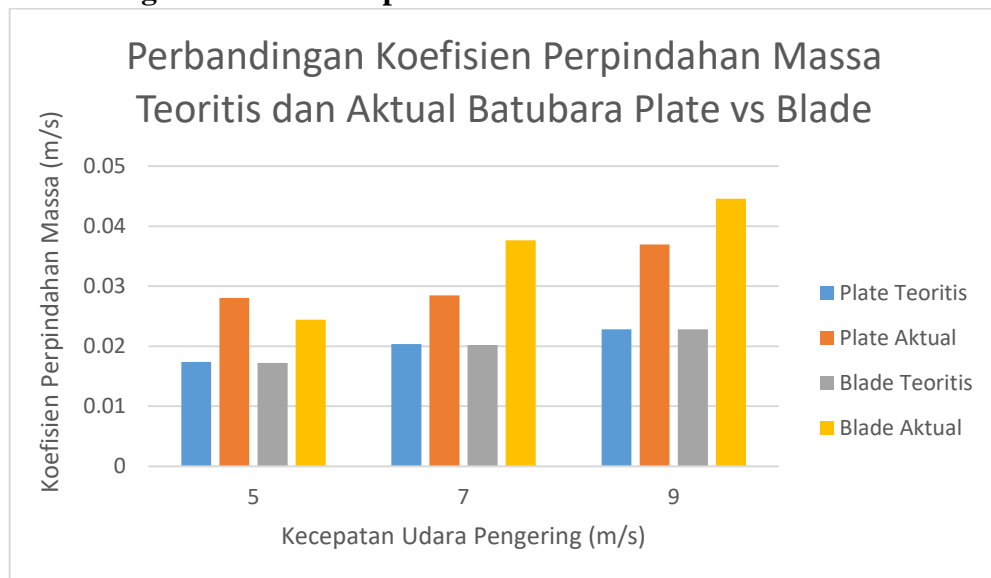
Gambar 4. 34 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Aktual Batubara fungsi kecepatan udara pengering pada perforated plate diameter 5 mm dan single row blade sudut 20°

Nilai koefisien perpindahan massa ini didapatkan dari *properties* yang diukur setelah melewati *drying bed* pada *drying chamber*. Dari grafik pada Gambar 4.34, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan massa pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s pada penggunaan *bed* jenis *perforated plate* diameter 5mm berturut-turut bernilai 0,028035 m/s, 0,028495 m/s, dan 0,036929 m/s. Selanjutnya, untuk nilai koefisien perpindahan massa pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s pada penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° berturut-turut bernilai 0,02443 m/s, 0,037662 m/s, dan 0,044577 m/s. *Trendline* pada grafik tersebut menunjukkan kenaikan nilai koefisien perpindahan massa seiring meningkatnya nilai kecepatan udara pengering yang digunakan dalam proses pengeringan. Semakin besar nilai koefisien perpindahan massa suatu benda, maka akan semakin besar pula laju perpindahan massa dari benda tersebut. Koefisien perpindahan massa ini dipengaruhi oleh nilai koefisien perpindahan panas sehingga nilai koefisien perpindahan massa akan berbanding lurus dengan nilai koefisien perpindahan panas.

Dari grafik sebelumnya yaitu pada Gambar 4.32 terlihat bahwa semakin tinggi nilai kecepatan udara pengering yang digunakan, semakin tinggi pula nilai koefisien perpindahan panasnya. Karena perubahan nilai koefisien perpindahan panas berbanding lurus dengan perubahan nilai koefisien perpindahan massa, maka terlihat pada Gambar 4.34 bahwa nilai koefisien perpindahan massa juga mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai kecepatan udara pengering yang digunakan selama proses pengeringan batubara berlangsung.

Nilai koefisien perpindahan massa pada penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s yang tersaji pada grafik di Gambar 4.34 terlihat paling besar dibandingkan dengan penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 5m/s dan 7m/s. Hal ini sesuai dengan teori bahwa nilai koefisien perpindahan panas dan massa akan semakin besar ketika kecepatan udara pengering semakin besar pula. Ketika nilai koefisien perpindahan panas dan massa semakin meningkat, maka laju perpindahan massanya juga akan semakin meningkat. 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. Hal ini sesuai dengan data yang ditampilkan pada grafik di Gambar 4.26 dimana nilai *drying rate* tertinggi ada pada proses pengeringan dengan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s saat penggunaan *bed* pengeringan jenis *single row blade* sudut 20°.

4.2.8.3 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis dan Aktual Batubara

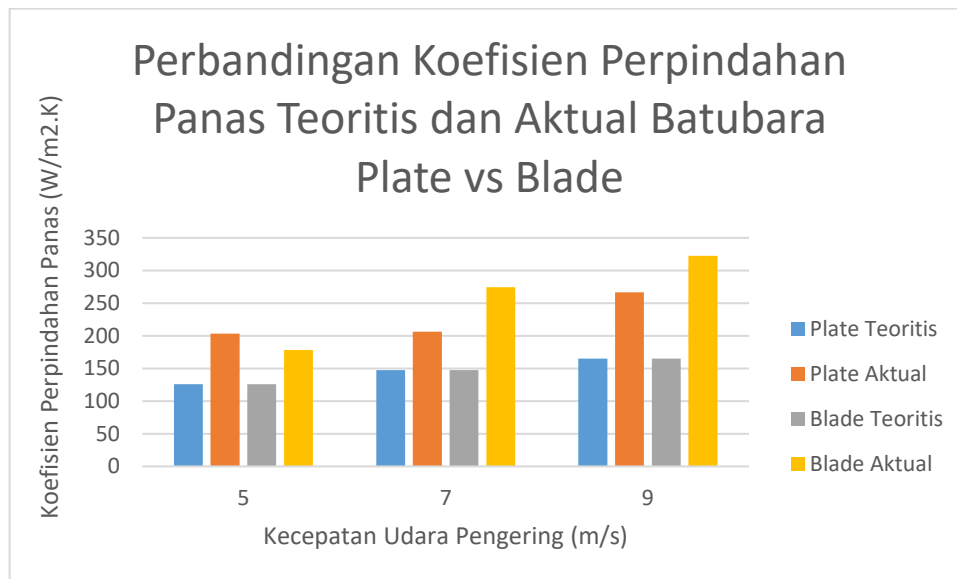


Gambar 4. 35 Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis dan Aktual Batubara Plate vs Blade

Ketika penyajian nilai koefisien perpindahan massa pada grafik di Gambar 4.33 dan Gambar 4.34 disatukan, akan terlihat perbedaan nilai koefisien perpindahan massa yang dapat kita amati pada grafik di Gambar 4.35. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa penggunaan 2 jenis *bed* pengeringan yang berbeda pada proses pengeringan batubara ini yaitu *perforated plate* diameter 5 mm dan *single row blade* sudut 20° akan memengaruhi nilai koefisien perpindahan massa dari batubara. Dari Gambar 4.35, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan massa secara teoritis lebih kecil dari pada nilai koefisien perpindahan massa secara aktual. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan *bed* jenis *perforated plate* diameter 5 mm dan *single row blade* sudut 20° akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa dari batubara.

Dari Gambar 4.35, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan massa aktual batubara yang tertinggi adalah ketika proses pengeringan pada kecepatan udara pengering sebesar 9m/s 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 kecepatan udara pengering sebesar 9m/s merupakan yang paling optimal dalam memindahkan kandungan air dari batubara ke udara pengering. Fenomena ini terjadi karena kecepatan udara pengering sebesar 9m/s memiliki nilai bilangan *Reynold* yang paling besar dan sudut pada *single row blade* menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *reynold number*nya 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 kecepatan udara pengering sebesar 9m/s.

Sesuai teori pada persamaan koefisien perpindahan massa, kenaikan koefisien perpindahan massa akan mengakibatkan kenaikan koefisien perpindahan panas batubara. Berikut ini merupakan grafik perbandingan koefisien perpindahan panas teoritis dan aktual fungsi kecepatan udara pengering penggunaan *bed* jenis *perforated plate* diameter 5mm dan *single row blade* sudut 20°.

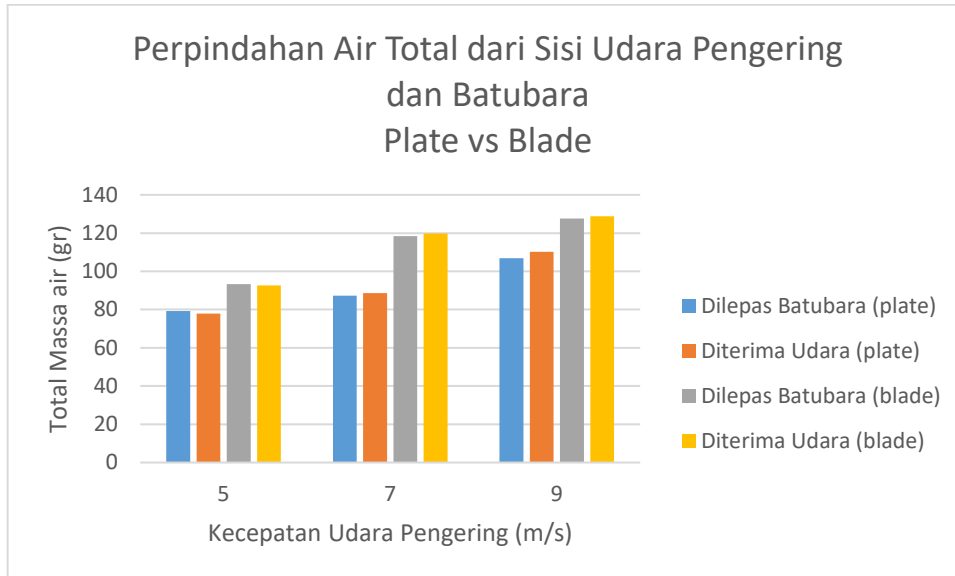


Gambar 4. 36 Perbandingan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis dan Aktual Fungsi Kecepatan Udara Pengering Penggunaan *Bed* Jenis *Perforated Plate* Diameter 5mm dan *Single Row Blade* Sudut 20°

Nilai koefisien perpindahan panas aktual ini diasumsikan didapat dari *properties* yang telah melewati *drying bed* pada *drying chamber*. Terlihat dari grafik pada Gambar 4.36 bahwa nilai koefisien perpindahan panas tertinggi terjadi ketika proses pengeringan pada kecepatan udara pengering sebesar 9m/s 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 kecepatan udara pengering sebesar 9m/s merupakan yang paling optimal dalam memindahkan kandungan air dari batubara ke udara pengering. Fenomena ini terjadi karena kecepatan udara pengering sebesar 9m/s memiliki nilai bilangan *Reynold* yang paling

besar dan sudut pada *single row blade* menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *reynold number*nya 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 kecepatan udara pengering sebesar 9m/s.

4.2.9 Analisa Pengaruh Kecepatan Udara Pengering terhadap Perpindahan Air Total dari Sisi Udara Pengering Dan Batubara pada *Perforated Plate* Dan *Single Row Blade*



Gambar 4. 37 Perpindahan Air Total dari Sisi Udara Pengering Dan Batubara pada *Perforated Plate* Dan *Single Row Blade*

Pada grafik di Gambar 4.37, terlihat bahwa ada perbedaan jumlah perpindahan massa air total selama proses pengeringan dari sisi udara dan batubara untuk tiga variasi kecepatan udara pengering yaitu sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s serta 2 variasi *drying bed* yaitu *bed* jenis *perforated plate* diameter 5mm dan *single row blade* sudut 20°. Nilai perpindahan massa air total dari sisi batubara saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* diameter 5mm pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu 79,3 gr, 87,3 gr, dan 106,9 gr. Nilai perpindahan massa air total dari sisi udara pengering saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* diameter 5mm pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu 77,9 gr, 88,6 gr, dan 110,2 gr. Nilai perpindahan massa air total dari sisi batubara saat penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu 93,3 gr, 118,4 gr, dan 127,7 gr. Nilai perpindahan massa air total dari sisi udara pengering saat penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu 92,7 gr, 119,7 gr, dan 128,8 gr.

Rata-rata perbedaan jumlah total massa air yang berpindah selama proses pengeringan berlangsung saat penggunaan *bed* jenis *perforated plate* diameter 5mm pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu 1,7%, 1,5%, dan 3,1%. Rata-rata perbedaan jumlah total massa air yang berpindah selama proses pengeringan berlangsung saat

penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° pada kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s berturut-turut yaitu 0,64%, 1,1%, dan 0,85%. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu keterbatasannya alat ukur berupa RH meter dalam membaca kondisi udara pengering akibat response time yang lambat, ketidakseragaman tingkat kelembaban dan temperatur udara pengering yang memasuki chamber, ketidakseragaman bentuk dan ukuran batubara, tidak tetapnya beban pengeringan karena pengambilan *sample*, penyimpanan *sample* yang kurang baik, serta penimbangan *sample* yang kurang presisi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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 kecepatan udara pengering sebesar 5m/s, 7m/s, dan 9m/s, didapatkan hasil paling optimal pada penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° dengan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s dalam proses pengeringan kandungan air di dalam batubara dengan temperatur tertinggi pada sisi outlet udara pengering sebesar 44,7°C dan nilai kelembaban terendah pada sisi outlet udara pengering sebesar 23%. Fenomena ini terjadi karena kecepatan udara pengering sebesar 9m/s memiliki nilai bilangan *Reynold* yang paling besar dan sudut pada *single row blade* menyebabkan arah aliran udara pengering memutar dan menjadi turbulen sehingga *Reynold Number*nya 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 kecepatan udara pengering sebesar 9m/s.
2. Setelah melakukan *plotting* properti temperatur 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. Rata-rata *drying rate* paling besar terjadi saat proses pengeringan dengan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s menggunakan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° yaitu sebesar 26,54 gr/menit.
4. Total penurunan jumlah *moisture content* paling banyak dalam waktu pengeringan selama 5 menit dicapai oleh proses pengeringan dengan kecepatan udara pengering sebesar 9m/s pada penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° yaitu sebesar 33%. Fenomena ini terjadi karena semakin besar kecepatan udara pengering 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. Proses pengeringan batubara dengan penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° dengan kecepatan 9m/s memiliki efektivitas yang tinggi pada menit pertama, pada menit selanjutnya justru nilai efektivitas saat penggunaan kecepatan udara pengering sebesar 7m/s lah yang paling tinggi. Maka dari itu, mulai menit kedua, kecepatan udara pengering dari 9m/s dapat diturunkan perlahan ke 7m/s kemudian ke 5m/s untuk menghemat energi yang digunakan.
6. Nilai koefisien perpindahan panas terbesar terjadi ketika penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° pada kecepatan udara pengering sebesar 9m/s secara teoritis dan aktual setelah terpengaruh koefisien perpindahan massa aktual berturut-turut sebesar $164,992\text{ W/m}^2\text{K}$ dan $322,33\text{ W/m}^2\text{K}$.
7. Nilai koefisien perpindahan massa terbesar terjadi ketika penggunaan *bed* jenis *single row blade* sudut 20° pada kecepatan udara pengering sebesar 9m/s secara teoritis dan aktual berturut-turut sebesar $0,023\text{ m/s}$ dan $0,045\text{ m/s}$.

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 pengondisian 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.
- Ibrahim, A. J. (2017). Studi Eksperimen Pengaruh Kecepatan Fluidisasi dan Jenis Bed Pengeringan terhadap Unjuk Kerja Swirling Fluidized Bed Coal Dryer Tanpa Pengaruh Aliran Berbentuk Cone. Surabaya.
- 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.
- Levy, E. (2005). Use of Coal Drying to reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants.
- 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.
- Tegar, A. (2014). Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Blade Tipe Single Row Distributor pada Swirling Fluidized Bed Coal Dryer terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara. Surabaya.
- 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.
- Widarwis, A. V. (2018). Studi Eksperimen Pengaruh Diameter Perforated Plate (5 Mm Dan 10 Mm) dan Kecepatan Udara dibawah Fluidisasi terhadap Kinerja Coal Dryer. Surabaya.

LAMPIRAN

Tabel A. 1 Lembar Pengambilan Data Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 5m/s

No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0	49,5	-	16	-	3,009	1,99
2	1	49,5	39,5	16	33,7	1,15	0,806
3	2	49,5	39,7	16	33,2	0,542	0,4
4	3	49,5	41	16	30,9	1,291	0,998
5	4	49,5	41,5	16	29,6	1,3	1,048
6	5	49,5	42	16	27,3	1,56	1,301

Tabel A. 2 Lembar Pengambilan Data Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 7m/s

No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0	49,5	-	16	-	3,009	1,99
2	1	49,5	37	16	38,7	1,618	1,167
3	2	49,5	38,2	16	35,4	0,896	0,693
4	3	49,5	38,7	16	33,9	0,735	0,603
5	4	49,5	39	16	32	1,249	1,066
6	5	49,5	39,4	16	30	1,222	1,072

Tabel A. 3 Lembar Pengambilan Data Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 9m/s

No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0	49,5	-	16	-	3,001	1,99
2	1	49,5	33	16	52	1,5	1,132
3	2	49,5	36	16	40	1,499	1,24
4	3	49,5	39	16	31,8	1,904	1,665
5	4	49,5	40	16	29,8	1,536	1,4
6	5	49,5	41,9	16	25,7	1,811	1,7

Tabel A. 4 Lembar Pengambilan Data Single Row Blade Sudut 20° Kecepatan 5m/s

No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0	49,5	-	16	-	3,009	1,99
2	1	49,5	34,5	16	47,6	2,485	1,79
3	2	49,5	36	16	42	1,519	1,169
4	3	49,5	39,5	16	34,8	1,438	1,172
5	4	49,5	40	16	32	2,089	1,79
6	5	49,5	40,7	16	29	1,614	1,42

Tabel A. 5 Lembar Pengambilan Data Single Row Blade Sudut 20° Kecepatan 7m/s

No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0	49,5	-	16	-	3,009	1,99
2	1	49,5	32,5	16	57	0,814	0,62
3	2	49,5	33,1	16	53	1,105	0,927
4	3	49,5	35,7	16	42	0,879	0,791
5	4	49,5	40	16	29,3	0,656	0,61
6	5	49,5	43	16	24,1	0,99	0,94

Tabel A. 6 Lembar Pengambilan Data Single Row Blade Sudut 20° Kecepatan 9m/s

No	Time (minute)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Mwet (gr)	Mdry (gr)
1	0	49,5	-	16	-	3,001	1,99
2	1	49,5	31,7	16	59,8	1,648	1,311
3	2	49,5	35,4	16	42	1,824	1,601
4	3	49,5	38,4	16	33	1,862	1,727
5	4	49,5	41	16	28,3	2,009	1,937
6	5	49,5	44,7	16	23	1,96	1,95

Tabel A. 7 Lembar Perhitungan Sisi Batubara Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 5m/s

Menit	Mwet (gr)	Mdry (gr)	Mc (%)	drying rate (gr/min)
0	3,009	1,99	34	
1	1,15	0,806	30	17,5
2	0,542	0,4	26	17,1
3	1,291	0,998	23	16,9
4	1,3	1,048	19	15,5
5	1,56	1,301	17	11,0

Tabel A. 8 Lembar Perhitungan Sisi Batubara Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 7m/s

Menit	Mwet (gr)	Mdry (gr)	Mc (%)	drying rate (gr/min)
0	3,009	1,99	34	
1	1,618	1,167	28	24,0
2	0,896	0,693	23	20,9
3	0,735	0,603	18	18,8
4	1,249	1,066	15	13,2
5	1,222	1,072	12	9,5

Tabel A. 9 Lembar Perhitungan Sisi Batubara Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 9m/s

Menit	mwet	Mdry	mc	drying rate
0	3,001	1,99	34	
1	1,5	1,14	24	38,76
2	1,499	1,235	18	25,55
3	1,904	1,649	13	16,88
4	1,536	1,39	10	15,55
5	1,811	1,685	7	10,19

Tabel A. 10 Lembar Perhitungan Sisi Batubara Single Row Blade Sudut 20° Kecepatan 5m/s

Menit	mwet	mdry	mc	drying rate
0	3,001	1,99	34	-
1	1,5	1,132	28	23,6
2	1,499	1,24	23	19,7
3	1,904	1,665	18	18,2
4	1,536	1,4	14	16,7
5	1,811	1,7	12	9,2

Tabel A. 11 Lembar Perhitungan Sisi Batubara Single Row Blade Sudut 20° Kecepatan 7m/s

menit	mwet	mdry	mc	drying rate
0	3,009	1,99	34	-
1	0,814	0,62	24	40,1
2	1,105	0,927	16	30,9
3	0,879	0,791	10	24,4
4	0,656	0,61	7	12,0
5	0,99	0,94	5	7,8

Tabel A. 12 Lembar Perhitungan Sisi Batubara Single Row Blade Sudut 20° Kecepatan 9m/s

menit	mwet	mdry	mc	drying rate
0	3,001	1,99	34	-
1	1,648	1,311	20	53,0
2	1,824	1,601	12	32,9
3	1,862	1,727	7	19,9
4	2,009	1,937	4	14,7
5	1,96	1,95	1	12,3

Tabel A. 13 Lembar Perhitungan Sisi Udara Pengering Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 5m/s

No	Time (min)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	ω_{in} (gr air/kg dry air)	ω_{out} (gr air/kg dry air)	\dot{m} (kg/s)	m dry air (kg)	m H ₂ O (gr)
1	0	49,5	-	16	-	12,06	-	0,0927	-	-
2	1	49,5	39,5	16	33,7	12,06	15,24	0,0927	5,5	17,5
3	2	49,5	39,7	16	33,2	12,06	15,17	0,0927	5,5	17,1
4	3	49,5	41	16	30,9	12,06	15,13	0,0927	5,5	16,9
5	4	49,5	41,5	16	29,6	12,06	14,88	0,0927	5,5	15,5
6	5	49,5	42	16	27,3	12,06	14,07	0,0927	5,5	11,04

Tabel A. 14 Lembar Perhitungan Sisi Udara Pengering Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 7m/s

No	Time (min)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	ω_{in} (gr air/kg dry air)	ω_{out} (gr air/kg dry air)	\dot{m} (kg/s)	m dry air (kg)	m H ₂ O (gr)
1	0	49,5	-	16	-	12,06	-	0,124	-	-
2	1	49,5	37	16	38,7	12,06	15,29	0,124	7,325	23,7
3	2	49,5	38,2	16	35,4	12,06	14,92	0,124	7,235	20,94
4	3	49,5	38,7	16	33,9	12,06	14,7	0,124	7,235	19,11
5	4	49,5	39	16	32	12,06	14,1	0,124	7,235	14,7
6	5	49,5	39,4	16	30	12,06	13,5	0,124	7,235	10,3

Tabel A. 15 Lembar Perhitungan Sisi Udara Pengering Perforated Plate Diameter 5mm Kecepatan 9m/s

No	Time (min)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	ω_{in} (gr air/kg dry air)	ω_{out} (gr air/kg dry air)	\dot{m} (kg/s)	m dry air (kg)	m H ₂ O (gr)
1	0	49,5	-	16	-	12,06	-	0,154	-	-
2	1	49,5	33	16	52	12,06	16,44	0,154	9,16	40,1
3	2	49,5	36	16	40	12,06	14,96	0,154	9,16	26,6
4	3	49,5	39	16	31,8	12,06	14	0,154	9,16	17,5
5	4	49,5	40	16	29,8	12,06	13,8	0,154	9,16	16,02
6	5	49,5	41,9	16	25,7	12,06	13,2	0,154	9,16	10,1

*Tabel A. 16 Lembar Perhitungan Sisi Udara Pengering Single Row Blade Sudut 20°
Kecepatan 5m/s*

No	Time (min)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	ω_{in} (gr air/kg dry air)	ω_{out} (gr air/kg dry air)	\dot{m} (kg/s)	m dry air (kg)	m H ₂ O (gr)
1	0	49,5	-	16	-	12,06	-	0,0927	-	-
2	1	49,5	34,5	16	47,6	12,06	16,42	0,0927	5,5	23,95
3	2	49,5	36	16	42	12,06	16,21	0,0927	5,5	22,8
4	3	49,5	39,5	16	34,8	12,06	15,75	0,0927	5,5	20,3
5	4	49,5	40	16	32	12,06	14,85	0,0927	5,5	15,3
6	5	49,5	40,7	16	29	12,06	13,95	0,0927	5,5	10,4

*Tabel A. 17 Lembar Perhitungan Sisi Udara Pengering Single Row Blade Sudut 20°
Kecepatan 7m/s*

No	Time (min)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	ω_{in} (gr air/kg dry air)	ω_{out} (gr air/kg dry air)	\dot{m} (kg/s)	m dry air (kg)	m H ₂ O (gr)
1	0	49,5	-	16	-	12,06	-	0,124	-	-
2	1	49,5	32,5	16	57	12,06	17,62	0,124	7,325	40,73
3	2	49,5	33,1	16	53	12,06	16,92	0,124	7,325	35,6
4	3	49,5	35,7	16	42	12,06	15,46	0,124	7,325	24,91
5	4	49,5	40	16	29,3	12,06	13,57	0,124	7,325	11,1
6	5	49,5	43	16	24,1	12,06	13,07	0,124	7,325	7,4

*Tabel A. 18 Lembar Perhitungan Sisi Udara Pengering Single Row Blade Sudut 20°
Kecepatan 9m/s*

No	Time (min)	Tin	Tout	Rhin (%)	Rhout (%)	Ω_{in} (gr air/kg dry air)	ω_{out} (gr air/kg dry air)	\dot{m} (kg/s)	m dry air (kg)	m H ₂ O (gr)
1	0	49,5	-	16	-	12,06	-	0,154	-	-
2	1	49,5	31,7	16	59,8	12,06	17,67	0,154	9,16	51,4
3	2	49,5	35,4	16	42	12,06	15,2	0,154	9,16	28,8
4	3	49,5	38,4	16	33	12,06	14	0,154	9,16	18,12
5	4	49,5	41	16	28,3	12,06	13,8	0,154	9,16	16,2
6	5	49,5	44,7	16	23	12,06	13,6	0,154	9,16	14,4

Tabel A. 19 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis Perforated Plate Diameter 5mm

No	T _∞	v	ρ	μ	Re	Pr	Nud	k	H
	(°K)	(m/s)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)				(W/m.K)	(W/m ² .K)
1	322,5	5	1,1	1,95E-05	1326,07	0,73	21,5	0,0279	125,99053
2		7			1872,51	0,73	25,1	0,0279	147,48821
3		9			2386,92	0,73	28,1	0,0279	164,99179

Tabel A. 20 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Teoritis Single Row Blade Sudut 20°

No	T _∞	v	P	μ	Re	Pr	Nud	k	H
	(°K)	(m/s)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)				(W/m.K)	(W/m ² .K)
1	322,5	5	1,1	1,95E-05	1326,07	0,73	21,5	0,0279	125,99053
2		7			1872,51	0,73	25,1	0,0279	147,48821
3		9			2386,92	0,73	28,1	0,0279	164,99179

Tabel A. 21 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Aktual Perforated Plate Diameter 5mm

No	T _∞	V	P	μ	Re	Pr	Nud	k	H
	(°K)	(m/s)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)				(W/m.K)	(W/m ² .K)
1	322,5	5	1,1	1,95E-05	2788,37	0,73	34,6	0,0279	203,1322
2		7			2889,31	0,73	35,2	0,0279	206,47042
3		9			5019,78	0,73	45,4	0,0279	266,72778

Tabel A. 22 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Aktual Single Row Blade Sudut 20°

No	T _∞	V	P	μ	Re	Pr	Nud	k	H
	(°K)	(m/s)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)				(W/m.K)	(W/m ² .K)
1	322,5	5	1,1	1,95E-05	2240,68	0,73	30,4	0,0279	178,5686
2		7			5340,41	0,73	46,7	0,0279	274,57878
3		9			7504,23	0,73	54,9	0,0279	322,32777

Tabel A. 23 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis Perforated Plate Diameter 5mm

No	T_{∞}	V	T_s	ρA_s	ρA_{∞}	hg	hf	hfg	Hm
	(°K)	(m/s)	(°K)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(Kj/Kg)	(Kj/Kg)	(Kj/Kg)	(m/s)
1	322,5	5	312,5	1,1204	1,09	2590,1	206,62	2383480	0,01738813
2	322,5	7	310	1,128	1,09	2590,1	206,62	2383480	0,02035505
3	322,5	9	306	1,14	1,09	2590,1	206,62	2383480	0,02284361

Tabel A. 24 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis Single Row Blade Sudut 20°

No	T_{∞}	V	T_s	ρA_s	ρA_{∞}	hg	hf	hfg	Hm
	(°K)	(m/s)	(°K)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(Kj/Kg)	(Kj/Kg)	(Kj/Kg)	(m/s)
1	322,5	5	307,5	1,136	1,09	2590,1	206,62	2383480	0,01724
2	322,5	7	305,5	1,142	1,09	2590,1	206,62	2383480	0,02023
3	322,5	9	304,7	1,144	1,09	2590,1	206,62	2383480	0,02282

Tabel A. 25 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Aktual Perforated Plate Diameter 5mm

No	T_{∞}	v	T_s	ρA_s	ρA_{∞}	mdot udara	$\Delta\omega$	nA	Hm
	(°K)	(m/s)	(°K)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/s)	(g/kg)	(kg/s)	(m/s)
1	322,5	5	312,5	1,1204	1,09	0,093	3,18	0,0003	0,02803
2	322,5	7	310	1,128	1,09	0,124	3,23	0,00038	0,0285
3	322,5	9	306	1,14	1,09	0,154	4,38	0,00065	0,03693

Tabel A. 26 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Aktual Single Row Blade Sudut 20°

No	T_{∞}	v	T_s	ρA_s	ρA_{∞}	mdot udara	$\Delta\omega$	nA	Hm
	(°K)	(m/s)	(°K)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/s)	(g/kg)	(kg/s)	(m/s)
1	322,5	5	307,5	1,136	1,09	0,093	4,36	0,00039	0,02443
2	322,5	7	305,5	1,142	1,09	0,124	5,56	0,00069	0,03766
3	322,5	9	304,7	1,144	1,09	0,154	5,61	0,00084	0,04458

Gambar A. 1 Penyimpanan Sample Batubara



Gambar A. 2 Pengeringan Menggunakan Perforated Plate



Gambar A. 3 Pengeringan Menggunakan Single Row Blade



BIOGRAFI PENULIS



Nadia Rizqi Andini lahir di Kota Pekalongan, tanggal 13 April 2001. Penulis merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Aisyiyah Ambokembang, SDN 06 Kedungwuni, SMP 2 Pekalongan, SMA 1 Pekalongan. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP 02111840000185.

Penulis aktif berorganisasi sebagai staf internal Mesin Music Club pada tahun 2019-2020. Selanjutnya, penulis menjabat sebagai kepala divisi internal Mesin Music Club pada tahun 2021-2022. Penulis tercatat sebagai asisten praktikum mata kuliah Mekanika Fluida I dan II pada tahun 2021 dan asisten praktikum mata kuliah Perpindahan Panas pada tahun 2021. Penulis tergabung dalam anggota laboratorium Rekayasa Thermal dan Sistem Energi sejak tahun 2020. Selain itu, penulis tercatat sebagai asisten laboratorium Rekayasa Thermal dan Sistem Energi pada tahun 2021-2022. 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: nadiarandini@gmail.com.