

TUGAS AKHIR - TM141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH DIAMETER PERFORATED PLATE (5 MM DAN 10 MM) DAN KECEPATAN UDARA DIBAWAH FLUIDISASI TERHADAP KINERJA COAL DRYER

Al Velian Suci Hadi Widarwis NRP. 02111645000029

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH DIAMETER PERFORATED PLATE (5 MM DAN 10 MM) DAN KECEPATAN UDARA DIBAWAH FLUIDISASI TERHADAP KINERJA COAL DRYER

Al Velian Suci Hadi Widarwis NRP. 02111645000029

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TM141585

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE PERFORATED PLATE DIAMETER (5 MM DAN 10 MM) AND AIR VELOCITY AT LOWER FLUIDIZATION FOR COAL DRYER PERFORMANCE

Al Velian Suci Hadi Widarwis NRP. 02111645000029

Academic Supervisor: Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING Faculty of Industrial Technology Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2018

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH DIAMETER PERFORATED PLATE (5 MM DAN 10 MM) DAN KECEPATAN UDARA DIBAWAH FLUIDISASI TERHADAP KINERJA COAL DRYER

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember





JULI, 2018

Studi Eksperimen Pengaruh Diameter *Perforated Plate* (5 mm dan 10 mm) dan Kecepatan Udara Dibawah Fluidisasi terhadap Kinerja *Coal Dryer*

Nama	: Al Velian Suci Hadi Widarwis
NRP	: 02111645000029
Jurusan	: Teknik Mesin
Dosen Pembimbing	: Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

Abstrak

Sumber energi yang paling banyak digunakan di Indonesia adalah batubara. Menurut Badan Geologi Nasional, Indonesia masih memiliki 160 miliar ton cadangan batu bara yang belum dieksplorasi. Jenis batubara yang mendominasi di Indonesia adalah lignite dan sub-bituminous dimana kualitasnya tergolong rendah karena memiliki nilai kalor rendah dengan moisture content yang cukup tinggi. Batubara paling sering digunakan sebagai bahan bakar pada PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap). Salah satu komponen pada PLTU adalah pulverizer, yang berfungsi untuk menghancurkan dan menghaluskan batubara sebelum dibakar dalam boiler. Kualitas dari batubara merupakan salah satu faktor penting yang menentukan agar peralatan PLTU bekerja secara efisien dan meningkatkan reliabity dari komponen-komponen PLTU. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas batubara adalah dengan proses pengeringan untuk menurunkan *moisture content* di dalam batubara yang berdampak pada meningkatnya *heating value*.

Pelaksanaan eksperimen ini dilakukan menggunakan serangkaian alat yang didesain untuk mengeringkan batubara dengan udara yang berperan sebagai media pengering. Dengan memodifikasi diameter lubang *perforated plate* (5 mm dan 10 mm) di dalam *drying chamber* pada *bed coal dryer*. Kecepatan udara pengeringan divariasikan pada 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Beban pengeringan pada tiap variasi sebesar 300 gram. Batubara terlebih

dahulu dipecahkan menjadi bentuk granular dengan rata-rata diameter sebesar \pm 6,5 mm. Pengambilan sampel batubara dilakukan tiap 1 menit hingga menit ke-5 kemudian dilanjutkan hingga menit ke-15 dengan interval 2 menit. Selanjutnya, untuk mendapatkan nilai *moisture content* pada batubara maka akan dilakukan pengeringan lebih lanjut menggunakan oven pada temperatur 105°C selama 180 menit.

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan. proses pengeringan yang paling cepat pada menit ke 1 hingga 7 yaitu pada kecepatan 6 m/s dengan diameter perforated plate 5 mm. Hal ini dikarenakan pada tiap 1 inch² perforated plate diameter 5 mm mencakup lebih banyak lubang jika dibandingkan dengan diameter 10 mm. Didapatkan nilai temperature outlet sebesar 49,7°C, nilai relative humidity terendah 16,1% pada akhir proses. Selain itu, penurunan moisture content mencapai 15,78% pada menit ke-15 dengan nilai drying rate rata-rata sebesar 5,3 gr/menit. Total massa air yang dapat dilepaskan batubara sebesar 58,0121 gram dengan nilai koefiesien perpindahan massa 0,06 m/s dan koefisien perpindahan panas sebesar 102,48 W/m².K. Namun, pada menit 9 hingga akhir pengeringan didapatkan nilai laju pengeringan yang relatif sama pada tiap variasi kecepatan. Sehingga, pada menit 9 disarankan menggunakan kecepatan yang diturunkan perlahan dari 5 m/s dan 4 m/s untuk menghemat energi yang digunakan.

Kata kunci: Coal Dryer, Drying Plate, Kecepatan Minimum Fluidisasi, Perforated Plate

Experimental Study of the Influence Perforated Plate Diameter (5 mm and 10 mm) and Air Velocity at Lower Fluidization for Coal Dryer Performance

Name	: Al Velian Suci Hadi Widarwis
NRP	: 02111645000029
Department	: Mechanical Engineering FTI-ITS
Academic Advisor	: Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng

Abstract

One of the most widely used energy is coal. According to National Geology Agency estimates that Indonesia has 160 billion tons of unexplored coal reserves. The dominant coal types in Indonesia are lignite and sub-bituminous which have low quality because of the low caloric value and high moisture content. The most commonly coal is used as fuel for steam power plant. One of the component in the steam power plant is pulverizer, which serves to crush and smooth the coal before it is used in the boiler. Therefore, the quality of coal is very important to determine the efficiency of the steam power plant's equipment and improve the reliability of the components. One way that can be done to improve the quality of the coal is the drying process, so it can reduce the amount of moisture content in the coal that can increase the value of heating.

The experiment is using a series of tool designed to dry the coal with air acting as a drying medium, by modifying the perforated plate (5 mm and 10 mm) in the drying chamber on the bed coal dryer. The drying air will be varied at 4 m/s, 5 m/s and 6 m/s from the minimum speed under fluidization. The drying load on each variation is 300 grams with the broken coal into granular coal shape with an average diameter of \pm 6,5 mm. Coal sampling is done in every one minute until five, the continued until 15th minutes with the interval 2 minutes. Next step to get the moisture content value, the coal will be done further by drying using oven at 105°C for 180 minutes.

From the experiment results, the faster drying process at a speed of 6 m/s with a 5 mm diameter perforated plate. It is because every 1 inch² perforated plate of 5 mm diameter includes more holes when compared to 10 mm diameter. The result of a temperature outlet value of $49,7^{\circ}$ C, at the end of process, the lowest relative humidity value is 16,1%. Beside, the moisture content value decrease and reach 15,78% in the 15th minutes with an average drying rate of 5,3 gr/minutes. The total mass of water which has been released by the coal is 58,0121 grams with mass transfer coefficient equal to 0,06 m/s and heat transfer coefficient equal to 102,48 W/m².K. However, at 9th minutes until the end of process, the results drying rate are realtively same at each of velocity variable. Thus, at 9th minutes it is recommended to use slowly lowered speeds of 5 m/s and 4 m/s to conserve the energy used.

Keywords: Coal Dryer, Drying Plate, Minimum Fluidization Speed, Perforated Plate

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

"STUDI EKSPERIMEN PENGARUH DIAMETER PERFORATED PLATE (5 MM DAN 10 MM) DAN KECEPATAN UDARA DI BAWAH FLUIDISASI TERHADAP KINERJA COAL DRYER"

Penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan syarat kelulusan akademis dan memperoleh gelar Sarjana Teknik dalam menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sehingga terselesaikannya dengan beberapa kekurangan dan kelebihannya. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

- 1. Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, M. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan bantuan sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
- 2. Bapak Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME., Bapak Ary Bachtiar Krishna Putra, ST., MT., Ph. D., dan Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M. Eng. Selaku dosen penguji yang telah memberikan saran serta masukan guna menyempurnakan Tugas Akhir ini.
- 3. Bapak Dr. Eng. Sutikno, ST., MT., selaku dosen wali selama penulis kuliah di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
- 4. Untuk Mas Erdien, Pak Melvin, Mas Chandra dan Mas Luqman atas bantuannya saat proses pengerjaan Tugas Akhir di Lab Pendingin.

- 5. Orang tua penulis, Papa Sulistyohadi Widarwis, Mama Sumariyam, terimakasih atas doa, nasehat, perhatian, serta materiil yang diberikan.
- 6. Kakak penulis, Alen Hadi Widarwis dan adik tersayang, Alvidin Hilmi Hadi Widarwis, terimakasih atas segala pengetahuan, motivasinya selalu menghibur disaat penulis membutuhkan hiburan selama pengerjaan.
- 7. Untuk Nugroho Tri Hutomo, terimakasih atas segala bantuannya sebagai partner eksperimen Tugas Akhir ini, untuk semangatnya, keluh kesah serta canda tawanya hingga berjuang bersama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
- 8. Untuk Sarin Azistarini, Naura Abida Djamil dan Mega Tertiasani sebagai sahabat-sahabat terbaikku dibangku perkuliahan.
- Untuk Sahabatku tercinta dari SMA Eka Rahmadina Widiyantoro dan Julia Permatasari yang tidak pernah berhenti memberikan dukungan serta mendengarkan curahan hati penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
- 10. Sahabat lama, Emil, Niken, Okty, Jip, Mas Maul, Hanif, Ayra, Ibs, Ratri, Shella dan Aca, terimakasih atas semangat, canda, dan kegilaannya.
- 11. Teman-teman mengambil data bersama di Lab Pendingin yang sekaligus menjadi anak bimbingan Pak Prabowo yaitu Renaldo Maxillion, Ikki Adji, Sudiasa, Baskoro, Suluh dan Petra atas segala bantuannya.
- 12. Terimakasih teman-teman LJ Teknik Mesin angkatan 2016, *Nice to meet you!*
- 13. Serta semua pihak yang belum tertulis dan yang tidak mungkin disebutkan satu persatu yang telah berperan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwasannya dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat beberapa kesalahan, keterbatasan serta kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Abstract	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Batubara	7
2.2 Mekanisme Pengeringan	9
2.3 Fluidized Bed Coal Dryer	11
2.4 Prinsip Perpindahan Panas dan Massa	
2.4.1 Prinsip Perpindahan Panas	14
2.4.2 Prinsip Perpindahan Massa	17

2.5 Prinsip Psychrometric	
2.6 Penelitian Terdahulu	
BAB 3	
METODOGI PENELITIAN	26
3.1 Instalasi Peralatan Penelitian	
3.2 Posisi Peletakan Alat Ukur	
3.3 Variabel Penelitian	
3.3.1 Variabel Bebas	
3.3.2 Variabel Terkontrol	30
3.4 Peralatan Penunjang	31
3.5 Metodologi Eksperimen	36
3.5.1 Studi Literatur	
3.5.2 Tahap Persiapan Alat	
3.5.3 Tahap Pengambilan Data	
3.5.4 Tahap Analisis Data	39
3.5.5 Lembar Pengambilan Data	39
3.6 Flowchart Penelitian	40
3.7 Flowchart Eksperimen	41
3.8 Jadwal Penelitian	45
BAB 4	47
PEMBAHASAN	
4.1 Data Hasil Eksperimen	47
4.2 Analisis dan Contoh Peritungan	47

4.2.1 Perhitungan Flow Open Area Perforated Plate. 47
4.2.2 Perhitungan Kecepatan Minimum Fluidisasi 49
4.2.3 Perhitungan Flow Area pada Selongsong
4.2.4 Perhitungan Kecepatan pada Selongsong
4.2.4 Perhitungan Mass Flow Rate Udara Pengering . 52
4.2.5 Contoh Perhitungan Massa Uap Air dan Drying rate pada Sisi Udara
4.2.6 Contoh Perhitungan <i>Moisture content</i> dan <i>Drying</i> <i>rate</i> pada Sisi Batubara
4.2.7Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas 57
4.2.8Contoh Perhitungan Perpindahan Massa Teoritis58
4.2.9 Contoh Perhitungan Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis terhadap Koefisien Perpindahan Massa Aktual
4.3Analisis Hasil Eksperimen dari Sisi Udara Pengering 61
4.3.1 Analisis Grafik Temperatur Udara <i>Outlet</i> Fungsi Waktu 61
4.3.2 Analisis Grafik <i>Relative Humidity Outlet</i> Fungsi Waktu 65
4.3.3 Analisis Psikometrik Chart Udara Pengering 69
4.4 Analisis Hasil Eksperimen dari Sisi Batubara
4.4.1 Analisis Grafik Moisture content Fungsi Waktu 74
4.4.2 Analisis Grafik Drying rate Fungsi Waktu 78

4.5 Analisis Hasil Eksperimen Pengaruh Kecepatan Pengeringan terhadap <i>Heat Transfer Coefficient</i> pada <i>Perforated Plate</i> Diameter 5 mm dan 10 mm
4.6 Analisis Hasil Eksperimen Koefisien Perpindahan Massa pada <i>Perforated Plate</i> diameter 5 mm dan 10 mm
4.7 Analisis Hasil Perpindahan Massa Air Total dari Sisi Udara dan Batubara terhadap Kecepatan Udara pada <i>Perforated Plate</i> Diameter 5 mm dan 10 mm
BAB 5
KESIMPULAN 89
5.1 Kesimpulan 89
5.2 Saran
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN
Tabel A.1 Lembar data massa batubara perforated plate diameter 5 mm 95
Tabel A.2 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 4 m/s (diameter = 5 mm)
Tabel A.3 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 5 m/s (diameter = 5 mm)
Tabel A.4 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 6 m/s (diameter = 5 mm)
Tabel A.5 Lembar data Temperatur dan Relative Humidityudara outlet perforated plate diameter 5 mm97

Tabel A.6 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 4 m/s ($d = 5 \text{ mm}$)
Tabel A.7 Perhitungan sisi udara pengeringan padakecepatan 5 m/s (d = 5 mm)
Tabel A.8 Perhitungan sisi udara pengeringan padakecepatan 6 m/s (d = 5 mm)
Tabel A.9 Perhitungan koefisien perpindahan massa dan panas (d = 5 mm)
Tabel A.10 Lembar data massa batubara perforated plate diameter 10 mm 101
Tabel A.11 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 4 m/s (d = 10 mm) 102
Tabel A.12 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 5 m/s (d = 10 mm) 102
Tabel A.13 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 6 m/s (d = 10 mm)
Tabel A.14 Lembar data Temperatur dan Relative Humidityudara outlet perforated plate diameter 10 mm 103
Tabel A.15 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 4 m/s (d = 10 mm) 104
Tabel A.16 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 5 m/s (d = 10 mm) 104
Tabel A.17 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 6 m/s (d = 10 mm) 105
Tabel A.18 Perhitungan koefisien perpindahan massa dan panas ($d = 10 \text{ mm}$)

Gambar	A.1	Foto	tampak	atas	proses	eksperimen
penge	eringa	n batul	oara			107
BIOGRAF	I PEN	ULIS.				108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema pulverizer, boiler dan air heater pada
pembangkit listrik tenaga uap2
Gambar 2.1 Grafik laju pengeringan 10
Gambar 2.2 <i>Drying chamber</i> 12
Gambar 2.3 Skema aliran udara pengering 12
Gambar 2.4 Ilustrasi proses pengeringan batubara 14
Gambar 2.5 Psychrometric chart 21
Gambar 2.6 Grafik penelitian <i>moisture content</i> fungsi waktu
Gambar 2.7 Design of plate (a) dutch wave mesh, (b)
perforated plate, (c) punched plate24
Gambar 2.8 Grafik penelitian <i>moisture content</i> fungsi waktu pada kecepatan 1.5 m/s
Gambar 3.1 Instalasi peralatan <i>fluidized bed coal drver</i> 26
Gambar 3.2 Skema instalasi peralatan <i>fluidized bed coal</i>
drver
Gambar 3.3 (a) profil 2D dan 3D <i>perforated plate</i> diameter 5
mm dan 10 mm
Gambar 3.4 Posisi peletakan themocouple dan RH meter . 29
Gambar 3.5 (a)thermocouple, (b)data logger, (c)RH meter,
(d)anemometer, (e)thermocontrol, (f)toolkit, (g)kompor dan
gas LPG, (h)heater, (i)voltage regulator, (j)timbangan beban
dan timbangan digital, (k)oven
Gambar 3.6 <i>Flowchart</i> penelitian
Gambar 3.7 <i>Flowchart</i> eksperimen ke-1
Gambar 4.1 (a) dimensi <i>perforated plate</i> diameter 5 mm dan
10 mm
Gambar 4.2 Free body diagram pada partikel batubara 49
Gambar 4.3 Drying Chamber

Gambar 4.4 Kondisi udara inlet dan outlet pada menit ke-1
untuk kecepatan 5 m/s dengan diameter perforated plate 5
mm
Gambar 4.5 Grafik temperature outlet udara pengering fungsi
waktu pada <i>perforated plate</i> diameter 5 mm
Gambar 4.6 Grafik temperature outlet udara pengering fungsi
waktu pada <i>perforated plate</i> diameter 10 mm 61
Gambar 4.7 Grafik temperature outlet udara pengering fungsi
waktu pada kecepatan 4 m/s 63
Gambar 4.8 Grafik temperature outlet udara pengering fungsi
waktu pada kecepatan 6 m/s 64
Gambar 4.9 Grafik Relative Humidity Outlet fungsi waktu
pada <i>perforated plate</i> diameter 5 mm
Gambar 4.10 Grafik Relative Humidity Outlet fungsi waktu
pada <i>perforated plate</i> diameter 10 mm
Gambar 4.11 Grafik Relative Humidity Outlet fungsi waktu
pada kecepatan 4 m/s 67
Gambar 4.12 Grafik Relative Humidity Outlet fungsi waktu
pada kecepatan 6 m/s 68
Gambar 4.13 Kondisi udara outlet beberapa menit
pengeringan pada perforated plate diameter 5 mm
Gambar 4.14 Kondisi udara outlet beberapa menit
pengeringan pada perforated plate diameter 10 mm 70
Gambar 4.15 Kondisi udara outlet beberapa menit
pengeringan pada kecepatan 4 m/s72
Gambar 4.16 Kondisi udara outlet beberapa menit
pengeringan pada kecepatan 6 m/s72
Gambar 4.17 Grafik moisture content fungsi waktu pada
perforated plate diameter 5 mm

Gambar 4.18 Grafik moisture content fungsi waktu pada
perforated plate diameter 10 mm74
Gambar 4.19 Grafik moisture content fungsi waktu pada
kecepatan 4 m/s76
Gambar 4.20 Grafik moisture content fungsi waktu pada
kecepatan 6 m/s76
Gambar 4.21 Grafik drying rate fungsi waktu pada
perforated plate diameter 5 mm78
Gambar 4.22 Grafik drying rate fungsi waktu pada
perforated plate diameter 5 mm78
Gambar 4.23 Grafik drying rate fungsi waktu pada kecepatan
4 m/s
Gambar 4.24 Grafik drying rate fungsi waktu pada kecepatan
6 m/s
Gambar 4.25 Grafik heat transfer coefficient fungsi
kecepatan pada perforated plate diameter 5 mm dan 10 mm
Gambar 4.26 Grafik mass transfer coefficient fungsi
kecepatan pada perforated plate diameter 5 mm dan 10 mm
Gambar 4.27 Grafik massa air total yang berpindah pada
perforated plate diameter 5 mm
Gambar 4.28 Grafik massa air total yang berpindah pada
perforated plate diameter 10 mm

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data sumber daya batubara di Indonesia (dala	m
juta ton)	1
Tabel 1.2 Karakteristik batubara	2
Tabel 2.1 Typical Ultimate Analyses for Coals	7
Tabel 3.1 Tahap analisis data	39
Tabel 3.2 Lembar pengambilan data	39
Tabel 3.3 Jadwal penelitian	45
Tabel 4.1 Properties udara pengering pada menit ke-1	53
Tabel 4.2 Nilai humidity ratio udara inlet dan outlet	pada
menit ke-1	54
Tabel 4.3 Data massa batubara hasil eksperimen	56

Halaman ini sengaja dikosongkan

BABI

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi pada manusia khususnya di Indonesia sangat beragam baik kebutuhan pokok maupun kebutuhan pendukung, sehingga diperlukan jumlah energi yang cukup besar untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut. Namun, tidak semua sumber energi dapat langsung digunakan, salah satu sumber energi yang paling banyak digunakan adalah batubara. Pada dasarnya batubara merupakan bahan bakar fosil yang berasal dari proses dekomposisi mahluk hidup jutaan tahun yang lalu dan termasuk dalam kategori batuan sedimen. Berdasarkan tingkat proses pembentukannya (tergantung pada tekanan, panas, dan waktu), batubara dapat dibagi dalam lima tingkatan, yaitu: antrasit, bituminous, sub-bituminus, lignit dan gambut. Antrasit merupakan tingkatan dengan kualitas paling tinggi sementara gambut memiliki kualitas paling rendah, kualitas batubara tergantung dari nilai High Heating Value (HHV) dan moisture content. Semakin tinggi tingkatan batubara maka kualitasnya semakin baik dan sebaliknya.

Negara	Bituminus (termasuk antrasit)	Sub-bituminus	Lignit	TOTAL
Amerika Serikat	115.891	101.021	33.082	249.994
Rusia	49.088	97.472	10.450	157.010
Republik Rakyat Tiongkok	62.200	33.700	18.600	114.500
Ceko	2.114	3.414	150	5.678
Indonesia	790	1.430	3.150	5.370
Sumber: Wikipedi	a a · a · a			

Tabel 1.1^[7] Data sumber daya batubara di Indonesia (dalam juta ton)

Sumber: Wikipedia

Berdasarkan Tabel 1.1. Jenis batubara yang mendominasi di Indonesia adalah *lignit* dan *sub-bituminous* dimana kualitasnya tergolong rendah karena memiliki nilai kalor yang rendah dengan *moisture content* yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan batubara jenis *bituminous* dan *antrasit*.

% weight	Anthracite	Bituminous	Sub- Bituminous	Lignite
Heat Content (Btu/lb)	13,000-15,000	11,000-15,000	8,500-13,000	4,000-8,300
Moisture	< 15%	2 - 15%	10 - 45%	30 - 60%
Fixed Carbon	85 - 98%	45 - 85%	35 - 45%	25 - 35%
Ash	10 - 20%	3 - 12%	≤ 10%	10 - 50%
Sulfur	0.6 - 0.8%	0.7 – 4.0%	< 2%	0.4 – 1.0%
Chlorine (ppm)	340 ± 40ppm	340 ± ppm	120 ± 20ppm	120 ± 20ppm

Tabel 1.2^[5] Karakteristik batubara

Sumber: Kementrian Energi Sumber Daya Mineral



Gambar 1.1 Skema *pulverizer*, *boiler* dan *air heater* pada pembangkit listrik tenaga uap^[6]

Menurut Badan Geologi Nasional, di Indonesia masih memiliki 160 miliar ton cadangan batu bara yang belum dieksplorasi. Batubara merupakan sumber energi yang selama ini banvak dimanfaatkan dalam berbagai bidang kehidupan masyarakat luas salah satunya untuk memenuhi kebutuhan listrik vaitu pada PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap). Salah satu komponen utama boiler dalam PLTU adalah Coal Firing System (CFS) yang berfungsi memanaskan batubara untuk memanaskan boiler, Subsistem CFS terdiri dari 5 komponen utama yaitu coal feeder, pulverizer, primary air fan, (d) air heater dan coal burner. Salah satu dari komponen tersebut yaitu *pulverizer* berfungsi untuk menghancurkan dan menghaluskan batubara sebelum digunakan dalam boiler. Mesin ini bekerja secara kontinu untuk dapat mengoptimalkan pembangkit, biasanya dipasang standby pulverizer untuk menggantikan jika ada pulverizer yang rusak. Batubara dengan spesifikasi dibawah ketentuan boiler akan berakibat dibutuhkankannya pasokan yang lebih untuk bisa memanaskan *boiler*. Hal ini berdampak pada *pulverizer* yang harus beroperasi lebih berat agar dapat memenuhi kapasitas yang diinginkan dari boiler tersebut. Jika terjadi kerusakan pada salah satu *pulverizer*, maka kapasitas mill dari batubara akan berkurang sehingga mengakibatkan supply batubara ke boiler juga akan berkurang. Boiler akan berkerja kurang maksimal dan akan berdampak pada performance PLTU. Maka dari itu kualitas dari batubara akan sangat penting dalam menentukan peralatan yang dipergunakan agar efisien serta meningkatkan reliabity dari komponen-komponen PLTU dalam penggunaanya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas batubara adalah dengan proses pengeringan, sehingga dapat menurunkan jumlah moisture content di dalam batubara yang dapat meningkatkan nilai *heating valuenya.*

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Bagaimana pengaruh lubang diameter 5 mm dan 10 mm pada *plate* berbentuk *perforated* terhadap *drying rate* batubara pada kecepatan di bawah fluidisasi?
- 2. Bagaimana pengaruh kecepatan dibawah fluidisasi $(4\frac{m}{s}, 5\frac{m}{s} dan 6\frac{m}{s})$ terhadap *drying rate* batubara?
- 3. Bagaimana proses perpindahan massa pada batubara selama pengeringan?
- 4. Bagaimana proses pengeringan dengan *psychrometric chart*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut :

- 1. Kecepatan udara dibawah fluidisasi
- 2. Beban pengeringan batubara untuk tiap variasi sama yaitu sebesar 300 gram.
- 3. Diameter batubara berukuran \pm 7 mm dan berbentuk bola.
- 4. *Heatloss* pada dinding *drying chamber* ke *surrounding* diabaikan.
- 5. Proses pengeringan berlangsung secara steady state.
- 6. Percobaan penelitian dilakukan pada temperatur ruangan (27°C)
- 7. Semua alat ukur dalam kondisi terkalibrasi

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Mengetahui pengaruh lubang diameter 5 mm dan 10 mm pada *plate* berbentuk *perforated* terhadap *drying rate* batubara pada kecepatan di bawah fluidisasi.
- 2. Mengetahui pengaruh kecepatan dibawah fluidisasi $(4\frac{m}{s}, 5\frac{m}{s} dan 6\frac{m}{s})$ terhadap *drying rate* batubara.
- 3. Mengetahui proses perpindahan panas dan massa pada batubara selama pengeringan

4. Mengetahui proses pengeringan dengan *psychrometric chart*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Memberikan pengetahuan tentang eksperimen proses pengeringan batubara menggunakan teknologi *fluidized bed dryer* sebagai cara untuk menaikkan nilai kalori batubara.
- 2. Memberikan data hasil perhitungan dari eksperimen supaya dapat dilakukan perkembangan untuk kedepannya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara merupakan salah satu sumber energi fossil yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Pembentukan batubara dapat terjadi akibat adanya sisa-sisa tumbuhan dan hewan di bawah sedimen yang mengalami perubahan kimia pada tekanan dan temperatur yang tinggi dalam kurun waktu yang lama. Komposisi penyusun batubara terdiri dari campuran hidrokarbon dengan komponen utama berupa karbon. Berdasarkan tabel dibawah ini, batubara dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Rank	As Received, Btu/lb	Constituents, Percent by Mass					
		Oxy- gen	Hydro- gen	Car- bon	Nitro- gen	Sul- fur	Ash
Anthracite	12,700	5.0	2.9	80.0	0.9	0.7	10.5
Semianthracite	13,600	5.0	3.9	80.4	1.1	1.1	8.5
Low-volatile bituminous	14,350	5.0	4.7	81.7	1.4	1.2	6.0
Medium-volatile bituminous	14,000	5.0	5.0	81.4	1.4	1.5	6.0
High-volatile bituminous A	13,800	9.3	5.3	75.9	1.5	1.5	6.5
High-volatile bituminous B	12,500	13.8	5.5	67.8	1.4	3.0	8.5
High-volatile bituminous C	11,000	20.6	5.8	59.6	1.1	3.5	9.4
Subbituminous B	9,000	29.5	6.2	52.5	1.0	1.0	9.8
Subbituminous C	8,500	35.7	6.5	46.4	0.8	1.0	9.6
Lignite	6,900	44.0	6.9	40.1	0.7	1.0	7.3

Tabel 2.1 Typical Ultimate Analyses for Coals

Table 8 Typical Ultimate Analyses for Coals

Sumber: Energi Solution Center

Terdapat dua jenis metode analisis yang digunakan untuk menentukan kualitas batubara, yaitu *proximate analysis* dan *ultimate analysis*. *Proximate analysis* merupakan metode analisis dengan pemeriksaan properti dasar batubara yang dapat mempengaruhi proses pembakaran, seperti *moisture content*, *volatile matter content*, *ash yield*, dan *fixed carbon yield*. Sedangkan *ultimate analysis* merupakan metode analisis dengan pemeriksaan komposisi unsur kimia yang terkandung di dalam batubara seperti karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, oksigen, dan klorin.

Salah satu properti dasar batubara yang dapat mempengaruhi proses pembakaran adalah *moisture content*. *Moisture content* dapat berpangaruh pada proses *ignition* dimana penguapan *moisture content* akan memakan energi dan kemudian dapat mengambat proses pembakaran. Terdapat empat jenis *moisture content* yang mungkin terjadi pada batubara yaitu:

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

Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung besarnya *moisture content* ditunjukan sebagai berikut ^[1]:

$$\% MC = \frac{m_b - m_k}{m_b} x 100\% \tag{2.1}$$

dengan:

 m_b = massa batubara basah (kg) m_k = massa batubara kering (kg) Properti lain yang digunakan untuk menganalisis batubara adalah nilai kalor. Nilai kalor batubara merupakan jumlah kalor yang dapat dilepaskan oleh setiap satuan massa batubara jika dibakar sempurna. Terdapat dua jenis nilai kalor pada batubara yaitu gross calorific value (GCV) dan net calorific value (NCV). Nilai GCV didapatkan dari panas laten penguapan dari air yang terdapat dalam batubara ditambah panas laten dari air yang terbentuk selama proses pembakaran, sedangkan pada NCV panas laten untuk membentuk uap air tidak diperhitungkan dalam harga nilai kalor karena panas laten ini terbuang dalam bentuk uap air.

2.2 Mekanisme Pengeringan

Proses pengeringan pada dasarnya merupakan proses pengurangan kandungan air pada suatu bahan dengan menggunakan media udara atau gas yang dilewatkan pada bahan tersebut. Kandungan air suatu bahan dapat mempengaruhi sifat dari suatu bahan. Sebagai contoh, batubara memiliki kandungan kadar air tertentu, dari kadar air ini menentukan golongan dari batubara tersebut.

Tujuan dari proses pengeringan adalah mengurangi kadar air suatu bahan sampai batas tertentu, dalam hal ini material yang digunakan ialah batubara. Kandungan kadar air yang tinggi dalam batubara *low rank* menyebabkan batubara memiliki *heating value* yang rendah, sehingga apabila digunakan sebagai bahan bakar akan menghasilkan energi yang kurang optimal dan efisien. Perlu dilakukan proses pengeringan terlebih dahulu untuk menurunkan kadar air yang terlalu banyak pada batubara tersebut.

Selama dilakukannya proses pengeringan, terjadi dua proses pada bahan secara bersamaan yaitu:

- 1. Proses 1: transfer panas dari udara pengering ke permukaan bahan sehingga *moisture* pada permukaan menguap.
- 2. Proses 2: *moisture* di dalam bahan berdifusi ke permukaan bahan dan kemudian menguap.

Pada Gambar 2.1 adalah grafik *drying rate* untuk proses pengeringan. Proses pengeringan terdiri dari tiga periode laju

pengeringan, Karakteristik pengeringan suatu bahan dapat diperoleh dengan menghitung *moisture content* pada bahan terhadap fungsi waktu. Berikut merupakan grafik laju pengeringan pada bahan terhadap fungsi waktu:



Gambar 2.1 Grafik laju pengeringan^[9]

Proses pengeringan pada bahan dibedakan menjadi 3 tahap, yaitu:

1. First Drying Stage (A-B)

Tahap pengeringan ini, grafik menunjukkan kenaikan pada titik A-B hal ini terjadi ketika bahan menerima panas sensibel dari udara pengering.

2. Second Drying Stage (B-C)

Berdasarkan gambar 2.1 dapat telihat bahwa pada tahap ini grafiknya konstan, ini disebabkan karena proses penguapan air bebas dari permukaan bahan dengan laju penurunan kadar air bahan berlangsung secara konstan. Selama proses berlangsung kecepatan air dari dalam bahan dengan yang berpindah akan sama dengan kecepatan air yang diuapkan. Proses ini akan berakhir saat kadar air dalam bahan mencapai titik kritis.

3. Third Drying Stage (C-D)

Pada tahap pengeringan ini dimulai dengan titik C yang menunjukkan kadar air kritis. Pada titik ini permukaan material yang dikeringkan tidak mampu mempertahan lapisan air yang *continue*. Seluruh permukaan akan terus mengering.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses pengeringan yang dibedakan menjadi dua golongan besar yaitu yang berhubungan dengan udara pengeringan dan faktor yang berhubungan dengan sifat batubara yang dikeringkan. Faktor yang tergolong primer dalam proses pengeringan diantaranya adalah suhu, kecepatan volumetrik aliran udara dan kelembaban udara. Faktor yang tergolong sekunder yaitu ukuran bahan, kadar air awal dan tekanan parsial dalam batubara.

2.3 Fluidized Bed Coal Dryer

Fluidized bed coal dryer adalah suatu alat pengering batubara dengan menggunakan prinsip dasar fluidisasi biasa digunakan untuk pengeringan partikel batubara yang berbentuk granural. Pada *fluidized bed coal dryer* ini, sistem berkerja dengan cara melewatkan aliran uap panas melalui sisi bawah *drying chamber* dengan menggunakan blower. Di bagian tengah *drying chamber* terdapat sebuah *plate* yang berbentuk *perforated* (lubang-lubang) dengan diameter tertentu yang digunakan sebagai pengarah aliran.



Gambar 2.2 Drying chamber

Bed coal dryer dikatakan terfluidisasi jika nilai dragforce dari partikel lebih besar dibanding gaya beratnya atau dengan kata lain aliran gas telah berhasil mengangkat seluruh partikel yang berada di dalam drying chamber. Kondisi ini dinyatakan sebagai kondisi minimum fluidisasi dan kecepatan gas yang dibutuhkan disebut sebagai kecepatan minimum fluidisasi.



Gambar 2.3 Skema aliran udara pengering
Untuk memperoleh nilai kecepatan minimum fluidisasi digunakan hukum pertama Newton dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sum F_y = 0 \tag{2.2}$$

$$Fd - W = 0 \tag{2.3}$$

$$Fd = W \tag{2.4}$$

Dari persamaan diatas, maka dapat menghitung kecepatan minimum yang di butuhkan yaitu:

$$\frac{1}{2} Cd \rho_{udara} V^2 A = \rho_{batubara} \forall g$$
(2.5)

$$V = \sqrt{\frac{2 \,\rho_{batubara} \,\forall \,g}{Cd \,\rho_{udara} \,A}} \tag{2.6}$$

dengan:

Fd =
$$Drag \ Force \ (kg \ m/s^2)$$

W = Berat batubara $(kg \ m/s^2)$
Cd = Koefisien $drag$ batubara
A = $Cross \ Sectional \ Area \ (m^2)$
V = Kecepatan fluidisasi minimum (m/s)
V = Volume batubara (m^3)
g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

$$\rho$$
 = Massa jenis (kg/m³)

2.4 Prinsip Perpindahan Panas dan Massa

Ilustrasi proses pengeringan pada eksperimen ini ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Ilustrasi proses pengeringan batubara

Keterangan:

Proses 1-2: proses pemanasan udara dengan menggunakan *heat exchanger*.

Proses 2-3: proses pengeringan batubara pada drying chamber.

2.4.1 Prinsip Perpindahan Panas

Besarnya laju perpindahan panas yang terjadi saat dilakukanya pengeringan antara udara pengering dan batubara dipengaruhi oleh nilai koefisien konveksi perpindahan panas, luasan permukaan batubara, dan perbedaan temperatur antara udara pengering dan permukaan batubara. Hubungan antara laju perpindahan panas antara udara pengering dan batubara dapat ditunjukan pada persamaan sebagai berikut ^[2]:

$$Q = h.A.\left(T_{\infty} - T_{s}\right) \tag{2.7}$$

dengan:

Q = laju perpindahan massa (W)

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)

A = luas permukaan batubara (m²) T_{∞} = temperatur udara pengering (K) T_s = temperatur permukan batubara (K)

Dari persamaan di atas diketahui bahwa laju perpindahan panas berbanding lurus dengan besarnya nilai koefisien konveksi, luasan permukaan batubara, dan perbedaan temperatur antara udara pengering dan permukaan batubara. Besarnya nilai koefisien konveksi dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ^[2]:

$$Nu = \frac{h.D}{k_f} \tag{2.8}$$

dengan:

Nu = Nusselt number

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)

D = diameter batubara (m)

 k_f =koefisien konduksi perpindahan panas (W/m²K)

Berdasarkan persamaan di atas, besarnya nilai koefisien konveksi perpindahan panas dipengaruhi oleh ukuran diameter bahan, nilai koefisien konduksi dan *Nusselt number*. Semakin besar ukuran diameter bahan maka nilai koefisien konveksi akan semakin kecil, sebaliknya apabila nilai koefisien konduksi dan *Nusselt number* semakin besar maka nilai koefisien konveksi juga akan meningkat.

Nusselt number merupakan fungsi dari *Reynolds number* dan *Prandtl number* yang dapat dinyatakan dalam bentuk persaaman berikut ^[2]:

$$Nu = f(x^*, Re)Pr^n \tag{2.9}$$

Adapun persamaan untuk *Prandtl number* dan *Reynolds number* ditunjukan sebagai berikut ^[2]:

$$Pr = \frac{v}{\alpha} \tag{2.10}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \tag{2.11}$$

dengan:

Pr = Prandtl number

Re = *Reynolds* number

 ρ = massa jenis udara pengering (kg/m³)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

D = diameter batubara (m)

 μ = viskositas absolut udara pengering (m²/s)

Dari persamaan *Prandtl number* diketahui bahwa semakin besar nilai difusivitas panas maka nilai *Prandtl number* akan semakin kecil sedangkan semakin besar nilai viskositas kinematik maka nilai *Prandtl number* akan semakin kecil. Pada persamaan *Reynolds number* diketahui bahwa nilai kecepatan fluida, diameter batubara, dan massa jenis udara pengering berbanding lurus dengan nilai *Reynolds number*, sebaliknya nilai viskositas absolut udara pengering berbanding terbalik dengan nilai *Reynolds number*.

Berdasarkan persamaan-persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai *Reynolds number* dan *Prandtl number* maka nilai *Nusselt number* juga akan semakin besar. Dengan nilai *Nusselt number* yang semakin besar maka akan didapatkan nilai koefisien konveksi yang besar pula sehingga laju perpindahan panas yang terjadi akan meningkat.

2.4.2 Prinsip Perpindahan Massa

Saat proses pengeringan berlangsung, *moisture content* di dalam partikel akan berdifusi ke permukaan partikel dan kemudian akibat adanya perpindahan panas secara konveksi antara udara pengering dan partikel maka *moisture content* tersebut akan menguap dan terbawa bersama udara pengering. Laju perpindahan sejumlah *moisture content* ini dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ^[2]:

$$N''_{A} = h_{m} \cdot (C_{A,S} - C_{A,\infty})$$
 (2.12)

Persamaan lain yang dapat digunakan untuk mencari nilai laju perpindahan massa dinyatakan dalam persamaan berikut ^[2]:

$$\boldsymbol{n}_{A} = \boldsymbol{h}_{\boldsymbol{m}} \cdot \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{s}} \left(\boldsymbol{\rho}_{\boldsymbol{A},\boldsymbol{S}} - \boldsymbol{\rho}_{\boldsymbol{A},\boldsymbol{m}} \right) \tag{2.13}$$

dengan:

 $\begin{array}{ll} N"_{A} &= molar \, flux \, (kg \, mol/m^2) \\ n_{A} &= laju \, perpindahan \, massa \, (kg/s) \\ h_{m} &= koefisien \, konveksi \, perpindahan \, massa \, (m/s) \\ C_{A,S} &= konsentrasi \, uap \, air \, permukaan \, bahan \, (kg \, mol/m^3) \\ C_{A,\infty} &= konsentrasi \, uap \, air \, medium \, pengering \, (kg \, mol/m^3) \\ \rho_{A,S} &= massa \, jenis \, uap \, air \, jenuh \, pada \, permukaan \, batubara \, (kg/m^3) \\ \rho_{A,\infty} &= massa \, jenis \, uap \, air \, udara \, pengering \, (kg/m^3) \end{array}$

Besarnya nilai koefisien perpindahan massa dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ^[2]:

$$Q = h \cdot A_{S} \cdot (T_{S} - T_{\infty}) = n_{A} \cdot h_{fg}$$
(2.14)

dengan:

h = koefisien perpindahan panas (W/m²K) A_{s} = luas permukaan batubara (m²) h_{fa} = evaporation enthalpy (Kj/Kg)

$$h . A_{S} . (T_{s} - T_{\infty}) = h_{m} . A_{S} (\rho_{As} - \rho_{A\infty}) . h_{fg}$$
 (2.15)

$$\frac{h}{h_m} = \frac{h_{fg}(\rho_{As} - \rho_{A\infty})}{(T_s - T_\infty)} \tag{2.16}$$

$$h_m = \frac{h(T_s - T_\infty)}{h_{fg}(\rho_{As} - \rho_{A\infty})}$$
(2.17)

Dari persamaan di atas, dapat diketahui bahwa nilai koefisien konveksi perpindahan panas berbanding lurus dengan koefisien konveksi perpindahan massa. Semakin besar nilai koefisien konveksi perpindahan panas maka nilai koefisien konveksi perpindahan massa juga akan semakin besar, begitu pula sebaliknya.

2.5 Prinsip Psychrometric

Psychrometric merupakan bidang ilmu yang mempelajari tentang karakteristik campuran udara dan uap air seperti *relative humidity, humidity ratio, dry bulb temperature,* dan *wet bulb temperature.* Hal ini sangat penting mengingat bahwa udara atmosfer merupakan campuran udara dan uap air. Adapun properti dari *psychrometric chart* antara lain:

- 1. Dry Bulb Temperature Dry bulb temperature merupakan nilai temperatur yang terbaca pada termometer dalam kondisi kering.
- 2. *Wet Bulb Temperature Wet bulb temperature* merupakan nilai temperatur yang terbaca pada termometer dengan kondisi termometer yang sengaja dibuat basah.
- 3. *Relative Humidity* (φ)

Relative humidity menunjukan banyaknya jumlah uap air yang terkandung di dalam udara pada fase gas. *Relative humidity* didefinisikan sebagai rasio antara fraksi molekul uap air dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh pada temperatur dan tekanan yang sama. *Relative humidity* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut^[1]:

$$\phi = \frac{P_{\nu}}{P_{sat}} \tag{2.18}$$

dengan:

 P_v = tekanan parsial uap air dalam udara basah

 P_{sat} = tekanan saturasi uap air pada temperatur yang sama

Relative humidity umumnya dinyatakan dalam persentase, ketika *relative humidity* bernilai 100% maka udara mencapai titik jenuh.

Berbeda dengan *specific humidity* dan *absolute humidity*, *specific humidity* (γ) merupakan rasio antara massa uap air dengan total massa udara dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ^[1]:

$$\gamma = \frac{M_w}{M_w + M_{da}} \tag{2.19}$$

dengan:

 $M_w = massa uap air yang terkandung (kg_{uap air})$

 $M_{da} = massa udara kering (kg_{udara kering})$

Sedangkan *absolute humidity* (d_v) mengacu pada banyaknya jumlah massa uap air yang terdapat pada volume sampel dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ^[1]:

$$d_v = \frac{M_w}{V} \tag{2.20}$$

dengan:

 $M_w = massa uap air (kg_{uap air})$

V = volume total sampel

4. Humidity Ratio (ω)

Humidity ratio merupakan rasio antara massa uap air dan massa udara kering yang terkandung dalam udara pada volume dan temperatur tertentu. Dalam teknik pengondisian udara, untuk menghitung rasio kelembaban dapat digunakan persamaan gas ideal dapat di tulis sebagai berikut ^[11]:

$$\omega = \frac{m_w}{m_{da}} = \frac{\frac{P_w V}{R_w T}}{\frac{P_{da} V}{R_{da} T}} = \left(\frac{P_w}{P_{da}}\right) \left(\frac{R_{da}}{R_w}\right) = \left(\frac{P_w}{P_{da}}\right) \left(\frac{M_w}{M_{da}}\right)$$
$$= \left(\frac{P_w}{P_{da}}\right) \left(\frac{18}{28.96}\right)$$
$$\omega = 0.622 \left(\frac{P_w}{P_{da}}\right) \tag{2.21}$$

dengan:

 $\omega = rasio kelembaban (kg_{uap air}/kg_{udara kering})$

_ _ _

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

 m_{da} = massa udara kering (kg_{udara kering}) P_w = tekanan parsial uap air (Pa) P_{da} = tekanan parsial uap udara kering (Pa) P = tekanan atmosfer (Pa) R_w = konstanta gas untuk uap air (461,5 J/kg.K) R_{da} =konstanta gas untuk udara kering (287 J/kg.K)

Sesuai dengan hukum Dalton bahwa besarnya tekanan atmosfer merupakan penjumlahan antara tekanan parsial udara kering dan tekanan parsial uap air $P = P_{da} + P_w$, sehingga persamaan rasio kelembaban dapat ditulis sebagai berikut ^[1]:

$$\omega = 0.622 \left(\frac{P_w}{P - P_w}\right) \tag{2.22}$$

Rasio kelembaban dapat dinyatakan dalam grains (sistem *British*), di mana 7000 grains uap air per lbm udara kering sedangkan untuk sistem SI dinyatakan dalam kg uap air/kg udara kering).

Adapun proses-proses udara yang terjadi berdasarkan *psychrometric chart* ditunjukan pada Gambar 2.5:



Gambar 2.5 Psychrometric chart^[8]

1. Proses Pemanasan dan Pendinginan (*Sensible Heating and Cooling*)

Proses pemanasan merupakan proses penambahan kalor sensibel ke udara sehingga temperatur udara akan meningkat. Sebaliknya proses pendinginan merupakan proses pengambilan kalor sensibel dari sehingga temperatur udara akan menurun. Proses pemanasan udara pada *psychrometric chart* ditunjukan pada garis horizontal dengan arah ke kanan sedangkan proses pendinginan ditunjukan pada garis horizontal dengan arah ke kiri.

2. Humidifikasi dan Dehumidifikasi (*Humidification and Dehumidification Process*)

Proses humidifikasi merupakan proses penambahan uap air pada udara sehingga udara mengalami kenaikan rasio kelembaban. Sebaliknya proses dehumidifikasi merupakan proses pengambilan uap air pada udara sehingga udara mengalami penurunan rasio kelembaban. Proses humidifikasi dan dehumidifikasi ini terjadi tanpa disertai perpindahan kalor sensibel. Proses humidifikasi pada *psychrometric chart* ditunjukan pada garis vertikal dengan arah ke atas, sedangkan dehumidifikasi ditunjukan pada garis vertikal dengan arah ke bawah.

Proses pengeringan batubara pada *fluidized bed coal* dryer ini ditunjukan pada Gambar 2.5. Proses 1 ke 2 merupakan proses pemanasan udara pengering yang ditandai dengan arah panah ke kanan. Pada proses pemanasan udara ini disebut sebagai sensible heating di mana terjadi kenaikan nilai dry bulb temperature pada udara dengan nilai rasio kelembaban yang konstan. Kemudian proses 2 ke 3 merupakan proses terjadinya perpindahan panas dan massa antara batubara dan udara pengering. Proses ini ditandai dengan arah panah ke kiri atas. Tanda arah panah ke kiri menunjukan terjadinya sensible cooling process pada udara pengering akibat panas yang berpindah ke batubara, sedangkan tanda arah panah ke atas menunjukan terjadinya humidification process pada udara pengering akibat berpindahnya uap air dalam batubara ke udara pengering.

2.6 Penelitian Terdahulu

a. Anbiya Katamsyi Qusrini (2017)

Penelitian yang telah dilakukan oleh Anbiya Katamsyi Qusrini berjudul Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Blade 10°, 30° dan 90° terhadap Kinerja Pengeringan Batubara pada Fluidized Bed Coal Dryer Tanpa Pengarah Aliran Berbentuk Cone. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh sudut blade terhadap laju pengeringan batubara dengan variasi sudut blade 10°, 30° dan 90° tanpa pengarah aliran berbentuk cone. Dari penelitian tersebut didapatkan jumlah moisture content tiap menit selama proses pengeringan untuk masing-masing sudut blade dan dapat ditunjukan pada grafik berikut ^[4]:



Gambar 2.6 Grafik penelitian moisture content fungsi waktu

Trendline grafik di atas menunjukan jumlah *moisture content* yang menurun terhadap fungsi waktu. *Moisture content* mengalami penurunan yang signifikan hingga menit ke-21. Penurunan jumlah *moisture content* selama proses pengeringan dapat terjadi akibat adanya uap air pada batubara yang terbawa secara terus-menerus oleh udara pengering. Jumlah *moisture content* pada menit ke-0 hingga menit ke-5 mengalami penurunan yang signifikan, hal ini disebabkan karena jumlah *moisture content* yang terdapat pada batubara untuk menit awal masih banyak. Pada menit-menit berikutnya penurunan jumlah *moisture content* tidak terlalu signifikan dikarenakan jumlah air pada batubara yang semakin sedikit dan laju difusi *moisture content* ke permukaan semakin kecil.

Berdasarkan grafik *moisture content* terhadap fungsi waktu, diketahui bahwa besarnya nilai penurunan *moisture content* paling kecil adalah pada pengeringan dengan sudut *vane* 90° selanjutnya diikuti sudut *vane* 30° dan 10° dengan nilai *moisture content* yang hampir sama pada menit ke-21. Namun penurunan jumlah *moisture content* paling cepat dicapai oleh variasi sudut *vane* 10°, kemudian diikuti sudut 30° dan 90°. Hal ini dapat terjadi karena perpindahan panas dan massa antara batubara dan udara pengering yang terjadi pada sudut *vane* 10° lebih besar akibat kecepatan aliran udara pengering dan *residence time* yang lebih besar dibandingkan dengan variasi sudut *vane* 30° dan 90°.

a. Harekrushna Sutar dan Vikas Kumar (2012)

Penelitian yang telah dilakukan oleh Harekrushna Sutar dan Vikas Kumar berjudul *The Effect of Distributor Design on Hydrodynamics of Conical Fluidized Bed Dryer* merupakan penilitian tentang pengeringan *placebo granular* (kapsul obat) dengan berat pembebanan 1 kg, 3 kg dan 5 kg pada kecepatan 1,5 m/s dan 3 m/s menggunakan *plate* yang berbentuk *dutch weave mesh* (seperti lubang kain tenun), *perforated plate* (lubang-lubang) dan *punched plate* yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 ^[3]. Dari penelitian tersebut maka didapatkan hasil penelitian yang tunjukan pada grafik Gambar 2.8 ^[3]



Gambar 2.7 Design of plate (a) dutch wave mesh, (b) perforated plate, (c) punched plate



Gambar 2.8 Grafik penelitian *moisture content* fungsi waktu pada kecepatan 1,5 m/s

Berdasarkan Gambar 2.8 menunjukkan trendline grafik di atas menunjukan jumlah moisture content yang menurun terhadap fungsi waktu pada beban 5 kg, tetapi pada beban 1 kg, kurva antara ketiga variasi plate berbentuk sama. Dari grafik moisture content terhadap fungsi waktu, diketahui dari hasil pengujian bahwa dengan kecepatan 1,5 m/s dan berat 5 kg bahwa penurunan moisture content paling cepat adalah jenis punched plate lalu diikuti dengan dutch weave mesh dan perforated plate. Hal ini disebabkan karena pada punched plate arah aliran horizontal yang melewati plate berubah menjadi lateral saat menembus bed sehingga frekuensinya naik dan mengakibatkan percampuran gas lateral yang meningkat sehingga kecepatannya menjadi lebih tinggi. Dengan jenis desain *punched plate*, perpindahan gas lebih terpusat pada kecepatan gas rendah. Namun seiring dengan meningkatnya kecepatan gas, dapat menyebabkan gas meresap ke pinggiran-pinggiran *bed* sehingga menghasilkan gas padatan yang lebih merata yang dapat menyumbat lubang pada punched plate.

BAB 3

METODOGI PENELITIAN

3.1 Instalasi Peralatan Penelitian

Penelitian dilaksanakan berdasarkan pada eksperimen sebelumnya Anbiya Katamsyi Qusrini (2017) dengan desain *drying chamber* tetap yaitu posisi *plate* dipasang dengan ujung metal *cone* sehingga aliran udaranya tidak dipengaruhi oleh metal *cone*, tetapi mengubah desain dari *plate* yang sebelumnya berbentuk *blade* menjadi *perforated*. Rangkaian alat ini didesain untuk mengeringkan batubara dengan udara yang berperan sebagai media pengering dengan suhu 50°C. Sebelum dikeringkan, batubara di pecahkan hingga diameter \pm 6,5 mm dan berbentuk bola. Instalasi skema peralatan penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2



Gambar 3.1 Instalasi peralatan fluidized bed coal dryer



Gambar 3.2 Skema instalasi peralatan fluidized bed coal dryer

Keterangan:

- 1. Dinding drying chamber
- 2. Perforated plate
- 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 hanya terbatas pada proses pengeringan batubara di dalam *drying chamber*. Untuk mengetahui laju pengeringan batubara maka akan dipasang *themocouple* pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber* yang berfungsi sebagai sensor suhu. Untuk mengetahui nilai temperatur yang terdeteksi oleh *thermocouple* maka thermocouple harus disambungkan pada data akusisi yang kemudian dapat terdisplay pada layar komputer. Selain itu akan dipasang pula Rh meter pada *inlet* dan *outlet drying chamber* untuk mengetahui besarnya *relative humidity* pada udara pengering.

Udara pengering masuk melalui sisi bawah samping *chamber* yang akan mengakibatkan aliran udara mengalir secara *cyclone*. Kemudian pada sisi tengah *drying chamber*, tepat sebelum udara mengenai batubara, terdapat *perforated plate* yang berfungsi sebagai pengarah aliran udara. Besarnya diameter lubang pada *perforated plate* ini akan mempengaruhi kecepatan udara yang melalui *plate* tersebut. Profil *perforated plate* pada *bed coal dryer* ini ditunjukan dengan gambar sebagai berikut:



Gambar 3.3 (a) profil 2D dan 3D *perforated plate* diameter 5 mm,(b) profil 2D dan 3D *perforated plate* diameter 10 mm

3.2 Posisi Peletakan Alat Ukur

Berikut merupakan posisi peletakan alat ukur pada *drying chamber*:



Gambar 3.4 Posisi peletakan themocouple dan RH meter

keterangan:

- 1. Pada posisi 1 dipasang *thermocouple* untuk membaca temperatur dan *RH meter* untuk membaca besarnya nilai *relative humidity* pada sisi masuk *drying chamber*.
- 2. Pada posisi 2 dipasang *themocouple* untuk membaca temperatur dan *RH meter* untuk membaca besarnya nilai *relative humidity* pada sisi keluar *drying chamber*.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan untuk melakukan eksperimen ini ditentukan sebagai berikut:

3.3.1 Variabel Bebas

- Lubang pada *perforated plate* Besar lubang yang terdapat di *perforated plate* divariasikan dengan diameter 5 mm dan 10 mm.
- 2. Kecepatan *inlet* udara pengering. Kecepatan *inlet* divariasikan masing masing pada 3 nilai, yaitu sebesar $4 \frac{m}{s}$, $5 \frac{m}{s} dan 6 \frac{m}{s} dari kecepatan$ dibawah Fluidisasi. Perubahan nilai kecepatan*inlet* diatur dengan mengubah besar*voltage sentifugal blower*.
- 3. Volt sentrifugal blower.

Voltage input sentrifugal blower ditentukan dengan menggunakan voltage regulator yang terhubung dengan input power dari sentrifugal blower dengan daya 750 watt dan rotasi 2800 rpm. Penentuan besar volt yang digunakan untuk mendapatkan nilai kecepatan dilakukan dengan mengkalibrasi voltage regulator terhadap sentrifugal blower dengan menggunakan alat ukur kecepatan udara, yaitu anemometer. Voltage regulator dari produk Matsunaga MFG. CO. LTD tipe Delux Slide Regulator

3.3.2 Variabel Terkontrol

1. Temperatur inlet udara pengering

Temperatur udara *inlet fluidized bed* diatur tetap pada temperatur 50°C. Pengendalian temperatur dilakukan dengan penggunaan *thermocontrol* yang diletakkan pada tangki air. Pengaturan temperatur *inlet* udara pengering ini tercapai dengan menjaga temperatur air (fluida panas pada sisi *tube heat exchanger*) pada temperatur $\pm 70^{\circ}$ C. 2. Diameter batubara

Batubara dipecahkan hingga berbentuk menyerupai granular dengan ukuran diameter rata rata $\pm 6,5$ mm.

3. Dimensi Peralatan Eksperimen Peralatan eksperimen ini terdiri dari berbagai alat, antara lain tangki air, *chamber pengeringan* (diameter luar = 199,5 mm; diameter dalam = 198 mm; dan tinggi dinding chamber = 1,5 mm), *compact heat exchanger* dengan dua buah kipas, sistem perpipaan air, dan ducting aliran udara. Keseluruh peralatan pada sistem *bed coal dryer* memiliki dimensi yang tetap selama proses ekperimen berjalan.

3.4 Peralatan Penunjang

Beberapa peralatan penunjang yang digunakan pada eksperimen ini antara lain sebagai berikut:







(d)



(e)

(f)



(g)

(h)



(i)



Gambar 3.5 (a)*thermocouple*, (b)*data logger*, (c)*RH meter*, (d)*anemometer*, (e)*thermocontrol*, (f)*toolkit*, (g)kompor dan gas LPG, (h)*heater*, (i)*voltage regulator*, (j)*timbangan beban dan timbangan digital*, (k)oven.

a. Themocouple

Themocouple digunakan untuk mengetahui temperatur udara pengering pada titik pengamatan. Selain itu themocouple juga dipasang pada heat exchanger untuk mengetahui temperatur air pemanas. Pada eksperimen ini digunakan themocouple tipe K dengan range -40°C hingga 750°C. Pada instalasi ini dipasang 6 themocouple yaitu pada sisi inlet dan outlet heat exchanger, saluran udara sesudah dan sebelum blower, inlet dan outlet drying chamber.

b. Data Logger

Untuk membaca temperatur yang terdeteksi oleh sensor *themocouple* dibutuhkan data akusisi. Alat ini akan dihubungkan pada komputer menggunakan kabel USB sehingga besarnya temperatur yang terdeteksi dapat ter*display* pada layar komputer. Data akusisi ini merupakan produk dari Daqwork Yokogawa (MX100) yang memiliki 6 grup dengan jumlah *channel* sebanyak 15 tiap grupnya dan setiap *channel* dapat dihubungkan dengan sebuah *themocouple*.

c. RH meter

RH meter berfungsi untuk mengetahui nilai *relative humidity* udara pengering pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber. RH meter* yang digunakan pada eksperimen ini merupakan produk dari *Elitech* tipe *RC-4HC*. Pada alat ini, besarnya nilai *relative humidity* dapat langsung muncul pada layar, namun tersedia kabel USB untuk mempermudah penyimpanan data pada komputer.

d. Anemometer

Anemometer berfungsi 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. Thermocontrol

Thermocontrol berfungsi untuk mengontrol temperatur air pemanas pada tangki air agar sesuai dengan temperatur kerja yang telah ditetapkan. *Thermocontrol* ini dirangkai dengan *heater* sehingga *heater* akan bekerja secara otomatis. *Heater* akan menyala apabila temperatur air pemanas terlalu dingin, dan begitu pula sebaliknya *heater* akan nonaktif apabila temperatur pemanas terlalu tinggi. *Themocontrol* yang digunakan merupakan produk dari XingHe (W2020) dengan *range* temperatur -55 s/d 120°C.

f. Toolkit

Berbagai *toolkit* seperti tang, gunting, obeng, solder, *test pen*, dan palu sangat dibutuhkan pada eksperimen ini terutama pada tahap persiapan dan separasi instalasi seperti, separasi cerobong, perangkaian *thermocontrol*, dan proses pemecahan batubara.

g. Kompor dan Gas LPG

Kompor digunakan untuk proses pemanasan air aquades di dalam tangki air dengan menggunakan gas LPG sebagai bahan bakarnya. Hal ini dikarenakan *heater* tidak mampu memanaskan air hingga mencapai temperatur yang diinginkan.

h. Heater

Heater digunakan untuk memanaskan air aquades hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Selain itu, *heater* ini juga dihubungkan dengan *thermocontrol* sehingga dapat menjaga temperatur air aquades agar tetap stabil.

i. Voltage Regulator

Voltage Regulator berfungsi untuk mengatur voltage input pada sentrifugal blower sehingga kecepatan udara yang hasilkan dapat terkalibrasi dengan anemometer. Voltage regulator yang digunakan pada eksperimen ini adalah produk Matsunaga MFG. CO. LTD tipe Delux Slide Regulator.

j. Timbangan Beban dan Timbangan Digital

Untuk mengukur massa batubara yang akan dimasukan ke dalam *drying chamber* yaitu sebesar 300 gr digunakan timbangan beban dengan range beban 0 s/d 2 kg. Kemudian digunakan timbangan digital dengan range 0,01-200 gram untuk mengukur massa sampel batubara yang terambil saat pengambilan data. Hal ini karena timbangan digital bersifat lebih akurat. Selain itu timbangan digital juga digunakan untuk mengetahui besarnya massa batubara yang telah dikeringkan menggunakan oven.

k. Oven

Setelah melakukan pengambilan sampel batubara yang telah dikeringkan menggunakan *bed coal dryer*, selanjutnya sampel akan dikeringkan menggunakan oven dengan temperatur 105°C selama 180 menit. Hal ini betujuan untuk mendapatkan besarnya massa batubara kering yang kemudian digunakan untuk menghitung *moisture content* yang terdapat pada batubara.

3.5 Metodologi Eksperimen

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.

3.5.1 Studi Literatur

Tujuan dilakukannya studi literatur yaitu untuk mengetahui dan memahami hal-hal berikut yaitu:

- a. Prinsip kecepatan fluidisasi.
- b. Prinsip perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan batubara.
- c. Prinsip karakteristik udara pada psychrometric chart.

3.5.2 Tahap Persiapan Alat

- 1. Mempersiapkan dan memastikan peralatan eksperimen berada dalam kondisi baik.
- 2. Memecahkan batubara dengan menggunakan *jaw crusher* hingga berbentuk bulat. kemudian batubara disaring menggunakan ayakan berukuran 5 mm dan 10 mm untuk mendapatkan ukuran batubara dengan ratarata $\pm 6,5$ mm.
- 3. Menimbang batubara menggunakan timbangan beban yaitu dengan massa sebesar 300 gram untuk setiap variasi. Pada eksperimen ini akan dilakukan dua variasi lubang *perforated plate* yaitu sebesar 5 mm dan 10 mm, selain itu dilakukan tiga variasi kecepatan dengan nilai sebesar 4 $\frac{m}{s}$, 5 $\frac{m}{s}$ dan 6 $\frac{m}{s}$ sehingga dibutuhkan batubara sebanyak 1800 gram untuk seluruh variasi.
- 4. Melakukan perhitungan kecepatan minimum fluidisasi dengan menggunakan persamaan 2.6.
- 5. Memastikan *themocouple* terpasang pada titik-titik yang telah ditentukan, dan memastikan sensor dapat

ter*display* pada layar komputer yang telah terinstal *software* MX100.

- 6. *RH meter* dipasang pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber*. Kemudian memastikan *RH meter* terhubung dengan baik pada komputer.
- 7. Mengisi tangki air dengan aquades kemudian panaskan aquades menggunakan kompor dan *heater*.
- 8. 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.
- 9. Menyalakan blower pada kecepatan tertentu. Kecepatan blower diatur berdasarakan hasil perhitungan kecepatan minimum dibawah fluidisasi yang diperoleh sebelumnya.

3.5.3 Tahap Pengambilan Data

- 1. Setelah alat siap digunakan, menunggu beberapa saat hingga temperatur udara pada *inlet drying chamber* bernilai 50°C.
- 2. Mencatat besarnya temperatur dan *relative humidity* pada sisi *inlet drying chamber* sebelum dilakukan pengerigan.
- 3. Mengambil dan menimbang butiran batubara sebanyak ±3 gram yang digunakan sebagai sampel batubara ke-0.
- 4. Setelah temperatur udara menunjukan angka 50° C, kemudian masukan butiran-butiran batubara sebanyak 300 gram.
- 5. Pengambilan sampel batubara dilakukan dengan interval waktu 1 menit selama 5 kali kemudian dengan interval waktu 2 menit untuk pengambilan data ke 6 hingga ke 10. Kemudian setiap sampel yang telah

diambil dimasukan ke dalam plastik klip dengan tanda dan urutan tertentu. Hal ini bertujuan untuk menjaga *moisture content* di dalam sampel batubara agar tidak berubah setelah dilakukan pengeringan.

- 6. Pada setiap pengambilan sampel barubara, catat besarnya temperatur dan *relative humidity* pada sisi *outlet drying chamber*.
- 7. Setelah pengambilan data selesai dilakukan, pastikan kompor, *blower*, pompa, kipas, dan *heater* dalam keadaan nonaktif. Kemudian instalasi dirapikan sesuai dengan kondisi semula.
- Menimbang dan memasukan masing-masing sampel batubara pada *alumunium foil* dengan tanda tertentu. Kemudian keringkan batubara di dalam oven pada temperatur 105°C selama 180 menit (ASTM D5142) untuk menghilangkan *moisture content* pada batubara secara keseluruhan.
- 9. Melakukan penimbangan pada masing-masing sampel yang telah dikeringkan dengan oven menggunakan timbangan digital.
- 10. Selesai.

3.5.4 Tahap Analisis Data

Analisis data dilakukan berdasarkan data yang didapatkan dari hasil eksperimen. Pada eksperimen ini akan dilakukan analisis mengenai *moisture content* batubara, *drying rate*, dan karakteristik udara pengering dilihat dari *psychrometric chart*.

Tabel 3.1	Tahap	analisis	data
-----------	-------	----------	------

Paramet	ter Input	Paramete	er Output
Konstan	Variasi	Diukur	Dihitung
• Temperatur inlet udara pengering (50°C)	 Diameter lubang perforated plate 5 mm 10 mm Kecepatan udara 4 m/s 5 m/s 6 m/s 	 Temperatur inlet udara pengering Temperatur outlet udara pengering % Relative humidity inlet drying chamber % Relative humidity outlet drying chamber Massa batubara hasil pengeringan fluidized bed coal dryer Massa batubara hasil pengeringan oven 	• Moisture content • Drying rate

3.5.5 Lembar Pengambilan Data

Lembar pengambilan data eksperimen ini ditunjukan sebagai berikut:

Tabel 3.2 Lembar pengambilan data

No	waktu (menit ke-)	T1 (inlet)	T2 (outlet)	RH inlet (%)	Rh outlet (%)	Massa batubara basah (gr)	Massa batubara kering (gr)
1	0						
2	1						
3	2						
4	3						
5	4						
6	5						
7	7						
8	9						
9	11						
10	13						
11	15						

3.6 Flowchart Penelitian

Tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan pada eksperimen ini ditunjukan pada *flowchart* sebagai berikut:



Gambar 3.6 Flowchart penelitian

3.7 Flowchart Eksperimen

Tahapan-tahapan yang dilakukan pada eksperimen ini dapat ditunjukan pada *flowchart* berikut:









Gambar 3.7 Flowchart eksperimen ke-1

3.8 Jadwal Penelitian

Jadwal penelitian pada eksperimen ini ditunjukan sebagai berikut:

Kegiatan	Januari 2018			Februari 2018			Maret 2018			April 2018				Mei 2018				Juni 2018				Juli 2018				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Studi literatur																										
Persiapan alat																										
Penulisan proposal TA																										
Pengujian alat (trial)																										
Seminar proposal TA																										
Pengambilan data																										
Pengolahan data																										
Sidang TA																										

Tabel 3.3 Jadwal penelitian

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen

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

4.2 Analisis dan Contoh Peritungan

4.2.1 Perhitungan Flow Open Area Perforated Plate

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

Untuk mendapatkan nilai laju massa aliran udara, perlu dihitung terlebih dahulu luasan *flow open area* pada *perforated plate* dan kecepatan minimum fluidisasi yang digunakan sebagai batas kecepatan yang akan digunakan. Perhitungan laju massa aliran udara untuk diameter 5 mm dan 10 mm ditunjukan sebagai berikut:

• Flow open area pada perforated plate

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



(b)

Gambar 4.1 (a) dimensi perforated plate diameter 5 mm,

(b) dimensi perforated plate diameter 10 mm

Dengan mengetahui nilai diameter *perforated plate* maka nilai dari *flow open area* yaitu sebagai berikut:

 $A_{perforated} = [L_{1 \, lubang \, perforated}] x total \, lubang \, perforated \, plate$

• *Flow open area perforated plate* diameter 5 mm Jumlah lubang = 324 buah

$$L_{1 \text{ lubang perforated 5 } mm} = \left[\frac{\pi}{4} d_{\text{perforated plate}}^2\right]$$
$$= \frac{\pi}{4} x 5^2 = 19,6 mm^2$$

For a ted 5 mm = 19,6 mm² x 324 = **6361,72 mm²**

• *Flow open area perforated plate* diameter 10 mm Jumlah lubang = 81 buah

Apert

$$L_{1 \, lubang \, perforated \, 10 \, mm} = \left[\frac{\pi}{4} d_{perforated \, plate}\right]^{2}$$
$$= \frac{\pi}{4} \, x \, 10^{2} = 78,5 \, mm^{2}$$
$$A_{perforated \, 10 \, mm} = 78,5 \, mm^{2} \, x \, 81 = 6361,72 \, mm^{2}$$

Dari kedua perhitangan diatas didapatkan nilai *flow open area* pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 6361,72 mm^2

4.2.2 Perhitungan Kecepatan Minimum Fluidisasi

Kecepatan minimum fluidisasi merupakan kecepatan minimum dari udara pengering agar batubara dapat terangkat/mengambang selama proses pengeringan berlangsung, sehingga nilai kecepatan minimum fluidisasi digunakan sebagai acuan untuk kecepatan dari udara pengeringan agar nilainya tidak melebihi. Kecepatan minimum fluidisasi diperoleh dengan menggunakan hukum kesetimbangan gaya. *Free body diagram* pada setiap partikel batubara pada saat proses pengeringan berlangsung ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Free body diagram pada partikel batubara

Gambar 4.2 menunjukan gaya-gaya yang bekerja pada batubara, sehingga persamaan kesetimbangan gaya yang digunakan agar batubara dapat terangkat adalah:

$$\sum_{F_{y}} F_{y} = 0$$

$$Fd - W = 0$$

$$Fd = W$$

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

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

dengan asumsi batubara berbentuk bola dengan diameter 7 mm $\rho_{udara(T=50^{\circ}C)} = 1,084 \frac{kg}{m^{3}}$ $\rho_{batubara} = 1450 \frac{kg}{m^{3}}$ $Cd_{bola} = 0,47$ $\forall_{bola} = \frac{4}{3}\pi r^{3} = \frac{4}{3}\pi (3,5x10^{-3})^{3}m^{3} = 1,795x10^{-7}m^{3}$ $A_{bola} = 4\pi r^{2} = 4\pi (3,5x10^{-3})^{2}m^{2} = 1,539x10^{-4}m^{2}$ $V_{min} = \sqrt{\frac{2 x 1450 \frac{kg}{m^{3}} x 1,795x10^{-7}m^{3} x 9,81 \frac{m}{s^{2}}}{0,47 x 1,084 \frac{kg}{m^{3}} x 1,539x10^{-4}m^{2}}}$

$$V_{min} = 8,0701 \, m/s$$

4.2.3 Perhitungan Flow Area pada Selongsong

Pada eksperimen ini, udara pengering mengalir melalui saluran atau selongsong yang memiliki luasan *flow area* yang berbeda dengan *perforated plate*. Karena adanya perbedaan luasan maka berakibat pada perbedaan kecepatan aliran udara yang mengalir antara di selongsong dengan di *perforated plate*.



Gambar 4.3 Drying Chamber

Selongsong pada *drying chamber* ini berbentuk pipa dan memiliki diameter 85 mm, maka dengan persamaan luasan lingkaran didapatkan nilai luasan selongsong *drying chamber* sebagai berikut:

$$A_{s} = \frac{\pi}{4} d_{i}^{2}$$

$$A_{s} = \frac{\pi}{4} 85^{2} mm^{2}$$

$$A_{s} = 5674,5 mm^{2}$$

$$A_{s} = 5674,5 x 10^{-3}m^{2}$$

4.2.4 Perhitungan Kecepatan pada Selongsong

Agar kecepatan minimum fluidisasi dapat tercapai, maka kecepatan aliran udara pada selongsong harus dihitung. Dengan luasan selongsong yang telah diketahui, kecepatan aliran udara pada selongsong dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kesetimbangan massa yaitu:

$$A_p \times V_{min} = A_s \times V_s$$
$$V_s = \frac{A_p \times V_{min}}{A_s}$$
$$V_s = \frac{6361,72 \ x \ 10^{-3} m^2 \ x \ 8,0701 \ m/s}{5674,5 \ x \ 10^{-3} m^2}$$
$$V_s = 9,047 \ m/s$$

4.2.4 Perhitungan Mass Flow Rate Udara Pengering

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

$$\dot{m} = \rho . V. A_p$$

Dari ketiga variasi kecepatan pada eksperimen, maka nilai dari *mass flow rate* udara pengerong tiap kecepatan berbeda-beda. Sebagai contoh perhitungan, laju alir massa udara pada kecepatan 5 m/s pada diameter 5 mm adalah sebagai berikut

dengan:

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

$$V_{udara \ pengering} = 5 \frac{m}{s}$$

$$A_{s} = 5674,5 \ x \ 10^{-3} m^{2}$$

$$\dot{m} = 1,0994 \frac{kg}{m^3} \times 5 \frac{m}{s} \times 5674,5 \times 10^{-3}m^2$$
$$\dot{m} = 0,034 \frac{kg}{s}$$

4.2.5 Contoh Perhitungan Massa Uap Air dan *Drying rate* pada Sisi Udara

Massa uap air

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

Posisi terukur	<i>Temperature dry bulb</i> (°C)	Relative Humdity (%)	
Inlet	49,5	14,5	
Outlet	44,5	27,6	

Tabel 4.1 Properties udara pengering pada menit ke-1

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



Gambar 4.4 kondisi udara *inlet* dan *outlet* pada menit ke-1 untuk kecepatan 5 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm

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

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

Posisi terukur	Humidity ratio (kg uap air/kg dry air)	
inlet	0,01093	
outlet	0,01668	

Berdasarkan data *humidity ratio* pada tabel 4.2 jumlah massa uap air yang diterima oleh udara dapat diperoleh dengan

mengalikan selisih *humidity ratio* pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber* dengan massa udara kering yang mengalir selama 1 menit. Persamaan untuk menghitung *humidity ratio* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \omega_{1} = \omega_{outlet} - \omega_{inlet}$$
$$\Delta \omega_{1} = (0,01668 - 0,01093)x \ 1000$$
$$\Delta \omega_{1} = 5,75 \ gr \ uap \ air / kg \ dry \ air$$

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

$$m_{dry \ air} = \frac{\text{in } x \ time}{\omega_{inlet} + 1}$$

$$m_{dry \ air} = \frac{0,034 \ kg/_S x \ 60 \ s}{\left(10,93 \ \frac{\text{gr } H_2 O}{kg \ dry \ air} x \ \frac{1 \ kg \ H_2 O}{1000 \ H_2 O}\right) + 1}$$

$$m_{dry \ air} = 2,07 \ kg \ dry \ air$$

Maka massa uap air yang diterima udara adalah:

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

 $m_{\omega 1} = 5,75 \frac{gr uap air}{kg dry air} \times 2,0755 kg dry air$

$$m_{\omega 1} = 11,934 \ gr \ uap \ air$$

4.2.6 Contoh Perhitungan *Moisture content* dan *Drying rate* pada Sisi Batubara

• Moisture content

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

Tabel 4.3 Data massa batubara hasil eksperimen

Menit ke	Massa Basah Batubara (gr)	Massa Kering Batubara (gr)	Massa Wadah (gr)
0	11,895	8,658	2,466
1	10,799	8,128	2,146

Berdasarkan data massa basah dan massa kering batubara pada tabel 4.3, jumlah *moisture content* yang terkandung pada batubara pada menit ke-0 dan menit ke-1 dapat diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut:

$$MC(\%wb) = \frac{massa \ basah \ bb - massa \ kering \ bb}{massa \ basah \ bb - massa \ wadah} x \ 100\%$$
$$MC_0(\%wb) = \frac{11,895 - 8,658}{11,895 - 2,466} x \ 100\% = 34,33\%$$

$$MC_1(\%wb) = \frac{10,799 - 8,128}{10,799 - 2,146} x \ 100\% = 30,86\%$$

• Drying rate

Besarnya nilai *drying rate* (gr/menit) pada menit pertama dapat diperoleh berdasarkan data pada tabel 4.3 dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Drying \ Rate_1 &= \frac{MC_0 \ x \ massa \ bb - \ MC_1 \ x \ massa \ bb}{waktu} \\ Drying \ Rate_1 &= \frac{34,33\% \ x \ 300 \ gr - \ 30,86\% \ x \ 300 \ gr}{1 \ menit} \\ Drying \ Rate_1 &= \frac{102,9 \ gr - \ 92,4 \ gr}{1 \ menit} \\ Drying \ Rate_1 &= \frac{10,387 \ gr/menit}{1 \ menit} \end{aligned}$$

4.2.7 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas

Proses perpindahan panas adalah proses perpindahan panas dari udara pengering ke dalam batubara secara konveksi sedangkan perpindahan massa adalah proses perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering. Pada proses pengeringan terjadi perpindahan panas dan massa yang hampir bersamaan, sehingga dibutuhkan koefisien untuk menentukan besarnya perpindahan panas dan massa antara udara pengering dan batubara. Sebagai contoh berikut yaitu untuk menghitung koefisien perpindahan panas dan massa untuk kecepatan 5 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 digunakan data yang telah terlampir pada lampiran Tabel A.9

a. Menghitung Reynolds Number (Re_D)

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

$$Re_{D} = \frac{1,0994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^{3}} \times 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,007 \text{ m}}{195,22 \times 10^{-7} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^{2}}} = 1971,058$$

b. Menghitung Nusselt Number (Nu_D)

$$Nud = 2 + 0.6xRe_D^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

= 2 + 0.6 x 1971,058¹/₂ x 0.703¹/₃
= 2 + 19,247 x 0.89
Nud = 25,71353

c. Nilai koefisien perpindahan panas (h)

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

$$h = 25,71353 \times \frac{0,0279}{0,007}$$

$$h = 102,4867 \frac{W}{m^2.K}$$

4.2.8 Contoh Perhitungan Perpindahan Massa Teoritis

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

$$Q = h \cdot A_S \cdot (T_{\infty} - T_S) = n_A \cdot h_{fg}$$
$$h \cdot A_S \cdot (T_{\infty} - T_S) = h_m \cdot A_S (\rho_{AS} - \rho_{A\infty}) \cdot h_{fg}$$
$$\frac{h}{h_m} = \frac{h_{fg}(\rho_{AS} - \rho_{A\infty})}{(T_S - T_{\infty})}$$
$$h_m = \frac{h (T_{\infty} - T_S)}{h_{fg}(\rho_{AS} - \rho_{A\infty})}$$

Dengan nilai

$$h = 102,486 \ W/m^2 K$$

$$h_{fg(T=322,5 K)} = h_g - h_f = (2590,1 - 206,62) \frac{kj}{kg}$$

$$= 2383,48 \frac{kj}{kg} = 2383,48 \ x \ 10^3 \frac{j}{g}$$

Diasumsikan (pada menit ke-1)

$$T_{s} = 313^{\circ}\text{C}$$

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

$$\rho_{As} = 1,0941 \ kg/m^{3}$$

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

$$h_{m} = \frac{102,486 \ W/_{m^{2}K} (322,5 - 313)^{\circ}\text{C}}{2383,48 \ x \ 10^{3} \frac{j}{g} (1,0941 - 1,0869)kg/m^{3}} = 0,0567 \frac{m}{s}$$

4.2.9 Contoh Perhitungan Perbandingan Koefisien Perpindahan Massa Teoritis terhadap Koefisien Perpindahan Massa Aktual

Nilai koefisien perpindahan massa secara teoritis telah dibahas pada subab sebelumnya, namun, nilai tersebut belum tentu sesuai dengan hasil perhitungan aktual yang telah dilakukan karena beberapa faktor. Sehingga perlu dilakukan validasi nilai dari hasil aktual terhadap perhitugan teoritis. Sebagai contoh berikut adalah perhitungan pada variasi kecepatan 5 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm.

a. Menghitung Laju Perpindahan Massa (n_A) $n_A = drying \ rate_{(menit \ ke \ 1)}$

$$= 10,38 \frac{gr}{min} \cdot \left[\frac{1 \, kg}{1000 \, gr}\right] \cdot \left[\frac{1 \, min}{60s}\right]$$
$$= 1,73 \, x \, 10^{-4} \, kg/s$$

b. Menghitung Luas Permukaan Batubara (A_{sur}) Berat total batubara = 300 gr Berat 1 batubara = 0,103 gr $A_{sur} = Jumlah \ berat \ bb \ x \ A_{sur(1batubara)}$

$$A_{sur} = \frac{300gr}{0,103gr} x \, 4\pi (3,5x10^{-3})^2 m^2$$
$$A_{sur} = 0,4483 \, m^2$$

c. Mengihitung Koefisien Perpindahan Massa Aktual (h_m')

$$\rho_{As} = 1,0941 \ kg/m^3$$

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

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

$$h'_m = \frac{1,73 \ x \ 10^{-4} \ kg/s}{0,4483 \ m^2(1,0941 - 1,0869) kg/m^3}$$

$$= 0,053 \ m/s$$
d. Validasi Nilai Hasil Aktual dengan Teoris

$$\frac{h_m - h'_m}{h'_m} x 100\% = \frac{0,056 - 0,053}{0,056} x 100\%$$

4.3 Analisis Hasil Eksperimen dari Sisi Udara Pengering

4.3.1 Analisis Grafik Temperatur Udara Outlet Fungsi Waktu

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm pada kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s



Gambar 4.5 Grafik *temperature outlet* udara pengering fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.6 Grafik *temperature outlet* udara pengering fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 10 mm

Pada eksperimen ini divariasikan tiga kecepatan pada tiap diameter yaitu 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s, dengan diameter perforated plate 5 mm dan 10 mm. Selain itu, dimensi drying chamber dan nilai temperatur inlet dari udara pengering yang tetap. Dari hasil eksperimen didapatkan hasil nilai temperatur outlet pada menit 0 yang mengalami kenaikan, yang seharusnya tetap seperti nilai temperatur inlet. Kenaikan temperatur outlet tersebut bukan disebabkan karena kenaikan kecepatan fluidisasi, tetapi dikarenakan meningkatnya temperature air ditangki saat disirkulasikan ke heat exchanger. Seharusnya nilai temperature outlet pada menit 0 nilainya konstan, karena temperature air untuk heat exchanger nilainya dijaga tetap konstan.

Temperatur *outlet* udara pengering pada menit pertama tercatat sebesar 44,7°C, 44,9°C, dan 45,2°C masing-masing untuk kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s pada pada diameter *perforated plate* 5 mm dan temperatur *outlet* udara pengering pada menit pertama tercatat sebesar 44,5°C, 45°C, dan 45,1°C masing-masing untuk kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s pada diameter *perforated plate* 10 mm. Kemudian temperatur udara pengering mengalami kenaikan hingga mendekati temperatur *inlet* pada menit ke-15.

Pada ketiga variasi kecepatan tersebut yang memiliki *Reynolds Number* terbesar adalah variasi kecepatan 6 m/s dan mengalami *heat transfer* rata-rata terbesar dibandingkan variasi lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 4.4 pada diameter *perforated plate* 5 mm dan Gambar 4.5 pada diameter *perforated plate* 10 mm. Dengan kombinasi Δ T dan *Reynolds Number* yang tinggi, maka dapat dipastikan bahwa *heat transfer* terbesar terjadi pada variasi kecepatan 6 m/s untuk tiap diameter *perforated plate*.

Dari grafik pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5, dapat diketahui bahwa *temperature outlet* udara pengering udara turun secara drastis pada menit ke-1, kemudian meningkat secara

perlahan pada menit-menit berikutnya. Hal dikarenakan pada awal proses pengeringan, temperatur permukaan batubara berada pada nilai terendahnya. Sehingga adanya perbedaan temperatur antara udara pengering dan temperatur permukaan batubara yang dapat meyebabkan terjadinya perpindahan panas terbesar dimenit-menit awal proses pengeringan pada ketiga variasi kecepatan tiap diameter *perforated plate*.



• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada v = 4 m/s

Gambar 4.7 Grafik *temperature outlet* udara pengering fungsi waktu pada kecepatan 4 m/s

 Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada v = 6 m/s



Gambar 4.8 Grafik *temperature outlet* udara pengering fungsi waktu pada kecepatan 6 m/s

Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukan besarnya nilai *temperature outlet* udara pengering pada sisi *outlet* untuk setiap menitnya pada diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm untuk kecepatan 4 m/s dan 6 m/s. Besarnya nilai *temperature outlet* pada menit pertama sebesar 44,7°C untuk diameter 5 mm dan 44,5°C untuk diameter 10 mm pada kecepatan 4 m/s, sedangkan nilai *temperature outlet* pada kecepatan 6 m/s dengan diameter 5 mm sebesar 45,2°C dan dengan diameter 10 mm 45,1°C.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa *temperature outlet* udara pengering turun secara drastis pada menit ke-1, kemudian meningkat secara perlahan pada menit-menit berikutnya. Hal dikarenakan pada awal proses pengeringan, temperatur permukaan batubara berada pada nilai terendahnya. Sehingga adanya perbedaan temperatur antara udara pengering dan temperatur permukaan batubara yang dapat meyebabkan terjadinya perpindahan panas terbesar dimenit-menit awal proses pengeringan. Pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan bahwa nilai grafik *temperature outlet* dari *perforated*

plate diameter 5 mm memiliki *trendline* lebih tinggi jika dibandingan dengan nilai *temperature outlet* pada *perforated plate* diameter 10 mm, hal ini disebabkan karena pada *perforated plate* diameter 5 mm udara pengering yang melewati *plate* lebih tersebar secara merata dan menyeluruh karena lubang yang digunakan ukurannya lebih kecil. Sehingga, proses pengeringan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm lebih baik jika dibandingkan dengan *perforated plate* diameter 10 mm pada kondisi kecepatan yang sama sebesar 4 m/s dan 6 m/s.

4.3.2 Analisis Grafik Relative Humidity Outlet Fungsi Waktu

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm pada kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s



Gambar 4.9 Grafik *Relative Humidity Outlet* fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.10 Grafik *Relative Humidity Outlet* fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 10 mm

Selain perubahan temperatur yang terjadi pada sisi *outlet* udara pengering, perubahan kondisi udara juga terjadi pada nilai *relative humidity*. Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 menunjukan besarnya nilai *relative humidity* udara pengering pada sisi *outlet* untuk setiap menitnya pada diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm untuk tiap tiga variasi kecepatan yaitu 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Besarnya nilai *relative humidity* pada menit pertama mencapai nilai tertinggi untuk tiap variasi yaitu 27,3%, 27,6%, dan 27,9% masing-masing untuk kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s pada diameter *perforated plate* 5 mm dan 27,2%, 27,8%, dan 28% masing-masing untuk kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s pada diameter *perforated plate* 10 mm.

Hal ini dapat terjadi karena jumlah kadar air yang terdapat pada batubara masih banyak sehingga terjadi perpindahan massa yang besar pula akibat banyaknya kadar air yang terbawa oleh udara pengering. Kemudian nilai *relative humidity* mengalami penurunan dan cenderung konstan hingga mencapai nilai yang hampir sama dengan nilai *relative humidity* pada sisi *inlet drying chamber*. Hal ini dapat terjadi karena jumlah kadar air yang terdapat pada batubara semakin sedikit akibat proses perpindahan massa yang terjadi pada menit sebelumnya sehingga proses perpindahan massa pun semakin kecil. Pada menit akhir, nilai *relative humidity* mencapai nilai yang hampir sama dengan nilai *relative humidity* pada sisi *inlet drying chamber* akibat jumlah kadar air yang terbawa oleh udara sangat sedikit sehingga proses perpindahan massa yang terjadi juga sangat kecil. Pada variasi kecepatan 6 m/s memiliki nilai *RH* tertinggi dan mengalami penurunan paling drastis jika dibandingkan dengan kecepatan 4 m/s dan 5 m/s. Sehingga dapat dikatakan bahwa variasi kecepatan 6 m/s cenderung memiliki kinerja pengeringan yang lebih baik setelah 1-7 menit pengeringan berlangsung dibandingkan kedua variasi lainnya.



• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada kecepatan 4 m/s

Gambar 4.11 Grafik *Relative Humidity Outlet* fungsi waktu pada kecepatan 4 m/s

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada kecepatan 6 m/s



Gambar 4.12 Grafik *Relative Humidity Outlet* fungsi waktu pada kecepatan 6 m/s

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 dapat diketahui bahwa *relative humidity* udara pengering meningkat pada menit ke-1 mencapai nilai tertinggi, kemudian menurun perlahan, pada menit-menit akhir nilai *relative humidity* mencapai nilai yang hampir sama dengan nilai *relative humidity* pada sisi *inlet drying chamber* akibat jumlah *moisture content* yang terbawa oleh udara sangat sedikit sehingga proses perpindahan massa yang terjadi juga sangat kecil. Pada kecepatan 4 m/s nilai *RH* dengan diameter 5 mm bernilai sebesar 24,8% dan dengan diameter 10 mm sebesar 23,9%. Pada kecepatan 6 m/s nilai *RH* dengan diameter 5 mm bernilai sebesar 25,2% dan dengan diameter 10 mm sebesar 25,9%.

Pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menunjukkan bahwa nilai grafik *relative humidity* dari *perforated plate* diameter 5 mm

memiliki *trendline* lebih rendah jika dibandingan dengan nilai *relative humidity* pada *perforated plate* diameter 10 mm, hal ini disebabkan karena pada *perforated plate* diameter 5 mm udara pengering yang melewati *plate* temperaturnya lebih tinggi jika dibandingkan dengan diameter 10 mm. Selain itu udara yang melewati *plate* pada diameter lebih kecil tersebar secara merata dan menyeluruh ke permukaan batubara yang dikeringkan. Sehingga, proses pengeringan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm lebih baik jika dibandingkan dengan gama sebesar 4 m/s dan 6 m/s.

4.3.3 Analisis Psikometrik Chart Udara Pengering

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm pada kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s



Gambar 4.13 Kondisi udara *outlet* beberapa menit pengeringan pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.14 Kondisi udara *outlet* beberapa menit pengeringan pada *perforated plate* diameter 10 mm

Kondisi udara pengering yang terjadi saat proses pengeringan berlangsung dapat diterapkan ke dalam bentuk *psychrometric chart*. Dari kedua gambar diatas adalah grafik plot hasil kondisi udara pengering sisi outlet pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm dengan variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Titik 0 menandakan kondisi udara pengering pada outlet *drying chamber* sebelum dimasukkan batubara, titik 1-15 merupakan outlet udara pada menit ke-1 hingga ke-15 pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm dengan masing-masing variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s.

Titik-titik yang diplot pada *psychrometric chart* di atas menunjukan kondisi udara yang terjadi pada menit ke 0, 1, 5 dan 15 untuk masing-masing variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm. Kemudian untuk mengalisa lebih lanjut, poin-poin yang telah diplot pada *psychrometric chart* tersebut dihubungkan satu dengan lainnya sehingga diperoleh grafik. Terdapat 3 grafik pada Gambar 4.13 yang diperoleh yaitu grafik untuk *perforated plate* diameter 5 mm, yang menghubungkan titik-titik berwarna biru untuk kecepatan 4 m/s dan kecepatan 5 m/s yang menghubungkan titik-titik bewarna oranye, serta yang terakhir yaitu grafik untuk kecepatan 6 m/s yang menghubungkan titik-titik berwarna hitam. Pada Gambar 4.14 diperoleh 3 grafik untuk *perforated plate* diameter 10 mm, dimana diperoleh grafik untuk kecepatan 4 m/s yang menghubungkan titiktitik berwarna hijau dan kecepatan 5 m/s yang menghubungkan titik-titik bewarna merah, serta yang terakhir yaitu grafik untuk kecepatan 6 m/s yang menghubungkan titik-titik berwarna ungu.

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

Besar dari nilai $\Delta\omega$ /time yang terjadi pada proses pengeringan menunjukan bagus atau tidaknya suatu proses pengeringan. Apabila semakin besar nilai $\Delta\omega$ /waktu maka proses pengeringan juga semakin bagus. Berdasarkan Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 diketahui bahwa nilai *humidity ratio* yang paling besar didapatkan pada proses pengeringan dengan kecepatan 6 m/s untuk tiap diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm. Sehingga pada variasi *perforated plate* 5 mm dan 10 mm pengeringan dengan menggunakan variasi kecepatan 6 m/s merupakan pengeringan yang paling cepat. • *Analisis perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada v = 4 m/s



Gambar 4.15 Kondisi udara *outlet* beberapa menit pengeringan pada kecepatan 4 m/s

• *Analisis perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada v = 6 m/s



Gambar 4.16 Kondisi udara *outlet* beberapa menit pengeringan pada kecepatan 6 m/s

Dari Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 menunjukkan proses yang terjadi pada udara pengering selama melewati *bed* batubara. Titik 0 menandakan kondisi udara pengering pada *outlet drying chamber* sebelum dimasukkan batubara. Titik-titik yang diplot pada *psychrometric chart* di atas menunjukan kondisi udara yang terjadi pada menit ke 0, 1, 5 dan 15 dengan diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm pada tiap-tiap kecapatan 4 m/s dan 6 m/s. Lalu titik tersebut saling dihubungkan hingga diperoleh grafik. Pada gambar 4.15 terdapat 2 grafik berwarna biru (diameter 5 mm) dan berwarna hijau (diameter 10 mm) pada kecepatan 4 m/s, sedangkan pada Gambar 4.16 terdapat 2 grafik yang berwarna ungu (diameter 5 mm) dan hitam (diameter 10 mm) pada kecepatan 6 mm.

Dari titik 0 menuju 1 mengalami proses *sensible cooling and humidifying*, karena bergerak menuju kiri atas. Kemudian titik-titik *outlet* yang sudah diplotkan tersebut perlahan bergeser lebih jauh ke kanan bawah hingga mendekati titik 0. Pergerakan ke arah kanan bawah dari titik 1 menuju titik berikutnya bukanlah merupakan proses *sensible heating and dehumidifying*, dari grafik tersebut menggambarkan jumlah selisih uap air yang terbawa oleh udara selama 5 menit pertama hingga 15 menit waktu pengeringan.

Berdasarkan Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 diketahui bahwa nilai *humidity ratio* yang paling besar didapatkan pada proses pengeringan dengan diameter *perforated plate* 5 mm untuk tiap variasi kecepatan 4 m/s dan 6 m/s. Sehingga pada tiap kecepan 4 m/s dan 6 m/s, proses pengeringan dengan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm merupakan pengeringan yang paling efisien.

4.4 Analisis Hasil Eksperimen dari Sisi Batubara

4.4.1 Analisis Grafik Moisture content Fungsi Waktu

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm pada kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s



Gambar 4.17 Grafik *moisture content* fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.18 Grafik *moisture content* fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 10 mm

Selama proses pengeringan berlangsung, jumlah *moisture content* yang terdapat pada batubara mengalami penurunan. Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 menunjukan grafik *moisture content* terdahap fungsi waktu (menit) selama 15 menit untuk tiap diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm pada variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Jumlah *moisture content* yang terdapat pada batubara ini terus mengalami penurunan, hingga pada menit ke-15 tercatat nilai *moisture content* adalah 18,15%, 17,27%, dan 15,78% untuk masing-masing variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm dan 17,96%, 16,94% dan 16,06% untuk masing-masing variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s dengan diameter *perforated plate* 10 mm.

Penurunan jumlah *moisture content* selama proses pengeringan dapat terjadi akibat adanya uap air pada batubara yang terbawa secara terus-menerus oleh udara pengering. Jumlah *moisture content* pada menit ke-0 hingga menit ke-7 mengalami penurunan yang signifikan, hal ini disebabkan karena jumlah *moisture content* yang terdapat pada batubara untuk menit awal masih banyak. Pada menit-menit berikutnya penurunan jumlah *moisture content* tidak terlalu signifikan dikarenakan jumlah air pada batubara yang semakin sedikit dan laju difusi *moisture content* ke permukaan semakin kecil.

Berdasarkan grafik *moisture content* terhadap fungsi waktu, diketahui bahwa besarnya nilai penurunan *moisture content* paling kecil pada tiap diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm adalah pada pengeringan dengan variasi kecepatan 4 m/s selanjutnya diikuti 5 m/s dan 6 m/s. Namun penurunan jumlah *moisture content* paling cepat dicapai oleh variasi kecepatan 6 m/s, kemudian diikuti kecepatan 5 m/s dan 4 m/s. Hal ini dapat terjadi karena perpindahan panas dan massa antara batubara dan udara pengering yang terjadi pada kecepatan 6 m/s lebih besar akibat kecepatan aliran udara pengering dan *residence time* yang lebih besar dibandingkan dengan variasi kecepatan 5 m/s dan 4 m/s.

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada kecepatan 4 m/s



Gambar 4.19 Grafik *moisture content* fungsi waktu pada kecepatan 4 m/s

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada v = 6 m/s



Gambar 4.20 Grafik *moisture content* fungsi waktu pada kecepatan 6 m/s

Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 menunjukkan distribusi nilai *moisture content* terhadap *drying time* dari sampel batubara pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm pada tiap kecepatan 4 m/s dan 6 m/s. Secara garis besar, jumlah *moisture content* pada pengeringan batubara mengalami penurunan, hal tersebut terjadi akibat adanya uap air pada batubara yang terbawa secara terus-menerus oleh udara pengering. Pada menit 7 tercatat nilai *moisture content* pada kecepatan 4 m/s dengan diameter 5 mm dan 10 mm berturut-turut yaitu 19,7% dan 20,8%, sedangkan pada kecepatan 6 m/s dengan diameter 5 mm dan 10 mm berturut-turut 17,7% dan 16,8%. Pada menit-menit berikutnya penurunan jumlah *moisture content* tidak terlalu signifikan dikarenakan jumlah air pada batubara yang semakin sedikit dan laju difusi *moisture content* ke permukaan semakin kecil.

Pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 menunjukkan bahwa nilai grafik moisture content dari perforated plate diameter 5 mm memiliki trendline lebih rendah jika dibandingkan dengan moisture content pada perforated plate diameter 10 mm, hal ini disebabkan karena pada perforated plate diameter 5 mm udara pengering yang melewati plate temperaturnya lebih tinggi jika dibandingkan dengan diameter 10 mm sehingga kadar uap air yang terbawa lebih besar yang mengakibatkan nilai moisture content yang lebih kecil. Selain itu udara yang melewati plate pada diameter lebih kecil tersebar secara merata dan menyeluruh ke dikeringkan. permukaan batubara yang Sehingga, proses pengeringan menggunakan perforated plate diameter 5 mm lebih baik jika dibandingkan dengan perforated plate diameter 10 mm pada kondisi kecepatan yang sama sebesar 4 m/s dan 6 m/s.

4.4.2 Analisis Grafik Drying rate Fungsi Waktu

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm pada kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s



Gambar 4.21 Grafik *drying rate* fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.22 Grafik *drying rate* fungsi waktu pada *perforated plate* diameter 5 mm

Karakteristik pengeringan batubara yang lain dapat ditinjau berdasarkan nilai laju pengeringannya (gram/menit). Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 menunjukan grafik drying rate terhadap fungsi waktu untuk masing-masing diameter perforated plate 5 mm dan 10 mm pada variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Grafik drying rate tersebut didapatkan berdasarkan nilai moisture content diperoleh dari hasil perhitungan sebelumnya. Laju vang pengeringan yang rata dicapai selama satu menit pertama (menit ke-0 hingga menit ke-1) adalah 9,3 gr/menit, 10,3 gr/menit, dan 16,7 gr/menit serta nilai rata-rata drying rate sebesar 3,7 gr/menit, 4.6 gr/menit dan 5.3 gr/menit untuk masing-masing variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm. Kemudian 8,8 gr/menit, 9,7 gr/menit dan 14,2 gr/menit serta nilai rata-rata drying rate sebesar 3,5 gr/menit, 4,04 gr/menit dan 4,6 gr/menit untuk masing-masing variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s dengan diameter perforated 10 mm.

Nilai laju pengeringan paling besar terjadi pada menit-menit awal proses pengeringan. Hal ini menunjukan banyaknya jumlah *moisture content* yang terbawa oleh udara akibat jumlah *moisture content* yang masih banyak pada menit awal pengeringan. Selanjutnya nilai laju pengeringan semakin menurun akibat dari jumlah *moisture content* pada batubara yang semakin sedikit.

Berdasarkan grafik *drying rate* terhadap fungsi waktu, diketahui bahwa nilai laju pengeringan paling besar dicapai pada kecepatan 4 m/s, selanjutnya diikuti kecepatan 5 m/s dan 6 m/s (pada menit pertama). Selain itu, penurunan nilai laju pengeringan yang paling signifikan dialami pada pengeringan dengan kecepatan 6 m/s, kemudian diikuti kecepatan 5 m/s dan 4 m/s. Kinerja laju pengeringan batubara tercepat pada menit ke 1 hingga 7 didapatkan hasil dengan menggunakan variasi kecepatan 6 m/s pada masing-masing diameter 5 mm dan 10 mm. Namun, pada menit 9 hingga akhir didapatkan nilai laju pengeringan yang relatif sama pada tiap

variasi kecepatan. Sehingga, pada menit 9 disarankan menggunakan kecepatan yang diturunkan perlahan dari 5 m/s dan 4 m/s untuk menghemat energi yang digunakan.



Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada kecepatan 4 m/s

Gambar 4.23 Grafik *drying rate* fungsi waktu pada kecepatan 4 m/s

• Analisis *perforated plate* diameter 5 mm vs 10 mm pada kecepatan 6 m/s



Gambar 4.24 Grafik *drying rate* fungsi waktu pada kecepatan 6 m/s

Gambar 4.23 dan Gambar 4.24 adalah grafik *drying rate* terhadap fungsi waktu untuk diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm pada masing-masing kecepatan 4 m/s dan 6 m/s. Grafik *drying rate* tersebut didapatkan berdasarkan nilai *moisture content* yang diperoleh dari hasil perhitungan sebelumnya. Pada kecepatan 4 m/s laju pengeringan yang dicapai selama satu menit pertama (menit ke-0 hingga menit ke-1) adalah 9,3 gr/menit dan 8,8 gr/menit untuk diameter 5 mm dan 10 mm. Kemudian dengan kecepatan 6 m/s 16,7 gr/menit dan 14,2 gr/menit untuk diameter 5 mm dan 10 mm.

Nilai laju pengeringan paling besar terjadi pada menit-menit awal proses pengeringan. Hal ini menunjukan banyaknya jumlah *moisture content* yang terbawa oleh udara akibat jumlah *moisture content* yang masih banyak pada menit awal pengeringan. Selanjutnya nilai laju pengeringan semakin menurun akibat dari jumlah *moisture content* pada batubara yang semakin sedikit.

Berdasarkan grafik *drying rate* terhadap fungsi waktu, diketahui bahwa nilai laju pengeringan menit ke-1 dengan *perforated plate* diameter 5 mm nilainya lebih tinggi jika dibandingkan diameter 10 mm. Selain itu, penurunan grafik nilai laju pengeringan pada *perforated plate* diameter 5 mm memiliki *trendline* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan menggunakan *perforated plate* diameter 10 mm. Hal ini disebabkan karena pada *perforated plate* diameter 5 mm, memiliki distribusi lubang yang lebih merata dan saling berdekatan sehingga udara pengering yang melewati *plate* tersebut mampu mengangkat air pada batubara secara lebih banyak dan menyeluruh. Sehingga berdasarkan besarnya nilai *drying rate* yang diperoleh, didapatkan bahwa proses pengeringan batubara paling

baik dilakukan dengan *perforated plate* diameter 5 mm dibandingkan dengan diameter 10 mm pada kecepatan yang sama.

4.5 Analisis Hasil Eksperimen Pengaruh Kecepatan Pengeringan terhadap *Heat Transfer Coefficient* pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm dan 10 mm



Gambar 4.25 Grafik *heat transfer coefficient* fungsi kecepatan pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm

Pada Gambar 4.25 menunjukkan grafik hasil eksperimen pengaruh kecepatan dengan variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s terhadap koefisien perpindahan panas pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm. Besarnya *heat transfer coefficient* dengan variasi diameter 5 mm yaitu sebesar 91,98 W/m².K, 102,48 W/m².K, dan 110,86 W/m².K untuk masing-masing kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Sedangkan besar *heat transfer coefficient* variasi diameter 10 mm yaitu sebesar 91,92 W/m².K, 102,14 W/m^2 .K, dan 111,16 W/m^2 .K untuk masing-masing kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s.

Dari *trendline* grafik pada Gambar 4.25 menunjukkan bahwa dengan semakin bertambahnya kecepatan maka nilai koefisien perpindahan panas akan semakin besar pula. Hal ini sesuai dengan teori, jika kecepatan berbanding lurus dengan *Reynolds Number*, dimana semakin tinggi kecepatan maka *Reynolds Number*, dimana semakin tinggi kecepatan maka *Reynolds Number* $Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$. Nilai *Reynolds* juga akan mempengaruhi *Nusselt Number* $Nu_D = 2 + (0.4Re_D^{-1/2} + 0.06Re_D^{-2/3}) \cdot Pr^{0.4} \cdot (\frac{\mu}{\mu_s})^{1/4}$, dimana semakin besar *Reynolds Number* maka *Nusselt Number* akan semakin besar pula. Nilai *Nusselt Number* akan mempengaruhi koefisien perpindahan panas $h = \frac{Nu_Dk_f}{D}$, dimana semakin besar *Nusselt Number* maka nilai koefisien perpindahan panas akan semakin besar. Nilai koefisien perpindahan panas mempengaruhi laju perpindahan panas $Q = h \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_S)$,

Berdasarkan gambar 4.25 dapat diketahui bahwa kecepatan 6 m/s memiliki nilai *heat transfer coefficient* paling besar. Pernyataan ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar kecepatan maka nilai koefisien perpindahan panas juga akan semakin besar. Jika semakin besar nilai koefisien perpindahan panas maka laju perpindahan panas akan semakin besar.



4.6 Analisis Hasil Eksperimen Koefisien Perpindahan Massa pada *Perforated Plate* diameter 5 mm dan 10 mm

Gambar 4.26 Grafik *mass transfer coefficient* fungsi kecepatan pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm

Perpindahan massa merupakan proses perindahan massa uap air bari batubara ke udara pengering. Pada Gambar 4.26 menunjukkan grafik pengaruh kecepatan terhadap koefisien perpindahan massa dengan variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s. Pada variasi diameter 5 mm ,besarnya *mass transfer coefficient* ditinjau secara teoritis berturut-turut yaitu sebesar 0,0447 m/s, 0,05673 m/s, dan 0,06528 m/s, sedangkan besar *mass transfer coefficient* ditinjau secara aktual berturut-turut yaitu sebesar 0,0431 m/s, 0,0536 m/s, dan 0,1006 m/s.. Pada variasi diameter 10 mm ,besarnya *mass transfer coefficient* ditinjau secara teoritis yaitu sebesar 0,0446 m/s, 0,0571 m/s, dan 0,0634 m/s untuk masing-masing kecepatan 4 m/s, 5 m/s 6 m/s, sedangkan besar *mass transfer coefficient* ditinjau secara aktual yaitu sebesar
0,0402 m/s, 0,0503 m/s, dan 0,0829 m/s untuk masing-masing kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s.

Trendline dari grafik pada Gambar 4.26 menunjukkan bahwa dengan semakin bertambahnya kecepatan maka nilai koefisien perpindahan massa akan semakin besar pula. Nilai koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi laju $n_A = h_m \cdot A_s(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}).$ perpindahan massa Koefisien perpindahan massa yang terjadi pada saat proes pengeringan dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas yang diterima batubara secara teoritis yaitu $h_m = \frac{h(T_{\infty} - T_s)}{h_{fg}(\rho_{As} - \rho_{A\infty})}$, sehingga besarnya perpindahan panas berbanding lurus dengan besarnya perpindahan massa. Sedangkan koefisien perpindahan panas yang diterima batubara secara aktual yaitu $h_m = \frac{n_A}{A_s(\rho_{As} - \rho_{A\infty})}$.Perhitungan koefisien perpindahan massa berdasarkan nilai teoritis dan aktual perlu divalidasi,karena seharusnya memiliki nilai yang sama.

Berdasarkan gambar 4.26 dapat diketahui bahwa kecepatan 6 m/s memiliki nilai mass transfer coefficient paling besar. Pernyataan ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar kecepatan maka nilai koefisien perpindahan panas juga akan semakin besar. Jika semakin besar nilai koefisien perpindahan panas maka laju perpindahan massa akan semakin besar. Namun hasil aktual menunjukan bahwa terdapat sedikit perbedaan antara h_m secara teoritis dan h_m aktual. Error rata-rata yang terjadi pada diameter perforated plate 5 mm dan 10 mm berturut-turut adalah 14,8% dan 15,9%. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu keakuratan alat ukur RH meter dan thermocouple, ketidakseragaman bentuk batubara, dan perubahan ukuran batubara yang terjadi selama proses pengeringan akibat tumbukan.

4.7 Analisis Hasil Perpindahan Massa Air Total dari Sisi Udara dan Batubara terhadap Kecepatan Udara pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm dan 10 mm



Gambar 4.27 Grafik massa air total yang berpindah pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.28 Grafik massa air total yang berpindah pada *perforated plate* diameter 10 mm

Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 menunjukan jumlah perpindahan massa air total yang terjadi selama proses pengeringan masing-masing dari sisi yang dilepas batubara dan sisi yang diterima udara untuk ketiga variasi kecepatan pada *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm. Dari gambar 4.27 diketahui bahwa jumlah total perpindahan massa air dengan diameter 5 mm pada pengeringan kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s dari sisi batubara berturut-turut adalah 43,2713 gr, 51,15927gr dan 58,0121 gr, kemudian jika dilihat dari sisi udara, jumlah total perpindahan massa air yang terjadi pada kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s berturut-turut adalah 40,0323 gr, 49,9000 gr dan 65,0400 gr. Sedangkan dengan diameter 10 mm pada kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s dari sisi batubara berturut-turut adalah 42,3957 gr, 45,6174 gr, dan 50,9509 gr, lalu dari sisi udara yaitu 39,9109 gr, 41,2327 gr dan 51,8068 gr.

Berdasarkan gambar 4.27 dan Gambar 4.28 dapat diketahui bahwa variasi kecepatan udara 6 m/s mampu memindahkan massa air dari batubara paling besar. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar kecepatan maka nilai koefisien perpindahan massa juga akan semakin besar. Jika semakin besar nilai koefisien perpindahan massa maka laju perpindahan massa akan semakin besar dan massa zat yang berpindah akan semakin besar pula.

Selain itu, berdasarkan teori besarnya massa air yang dilepas batubara dan massa air yang diterima oleh udara haruslah sama. Namun hasil eksperimen menunjukan bahwa terdapat sedikit perbedaan antara massa air yang dilepas batubara dengan massa air yang diterima oleh udara. Error rata-rata yang terjadi pada diameter 5 mm dengan kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6/s berturut-turut adalah 7,4%, 2,4%, dan 12,1%, sedangkan error rata-rata pada diameter 10 mm dengan kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s berturut-turut adalah 9,6%, 9,6%, dan 1,6% Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu keterbatasannya alat ukur *RH*

meter dalam membaca kondisi udara akibat *response time* yang lambat, ketidakseragaman bentuk dan ukuran batubara, serta tidak tetapnya beban pengeringan karena keperluan *sampling*.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan Analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal yang penting pada eksperimen ini diantaranya sebagai berikut

- Pada ketiga variasi kecepatan dengan *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm, didapatkan hasil terbaik dari proses pengeringan pada kecepatan 6 m/s dengan *perforated plate* diameter 5 mm dengan nilai *temperature outlet* tertinggi pada akhir proses sebesar 49,7°C dan nilai *RH* terendah sebesar 16,1%. Hal ini disebabkan karena udara pengering yang melewati *plate* lebih tersebar secara merata dan menyeluruh karena lubang yang digunakan ukurannya lebih kecil dengan kecepatan yg lebih tinggi.
- 2. Pada *psychrometric chart* kondisi udara mengalami 2 proses yaitu proses *sensible heating* (bergerak lurus ke arah kanan) akibat perpindahan panas antara udara dan air panas di *heat exchanger*, kemudian udara mengalami proses *cooling and humidifying* (bergerak ke arah kiri atas) akibat terjadinya perpindahan panas dan massa antara udara dan batubara di dalam *drying chamber*.
- 3. Pada menit awal terjadi penurunan *drying rate* yang signifikan pada masing-masing variasi, namun rata-rata *drying rate* paling baik dicapai dengan variasi kecepatan 6 m/s dengan *perforated plate* diameter 5 mm yaitu sebesar 5,3 gr/menit. Hal ini disebabkan karena diameter 5 mm, memiliki distribusi lubang yang lebih merata dan saling berdekatan sehingga udara pengering yang melewati *plate*

tersebut mampu mengangkat air pada batu bara secara lebih banyak dan menyeluruh.

- 4. Total penurunan jumlah *moisture content* paling cepat dicapai oleh variasi kecepatan 6 m/s dengan diameter 5 mm pada menit ke-15 tercatat sebesar 15,78%. Hal ini terjadi karena perpindahan panas dan massa antara batubara dan udara pengering lebih besar akibat kecepatan aliran udara pengering, selain itu dengan diameter 5 mm proses pengeringannya lebih teratur dan merata.
- 5. Kinerja laju pengeringan batubara tercepat pada menit ke 1 hingga 7 didapatkan hasil dengan menggunakan variasi kecepatan 6 m/s pada diameter 5 mm dengan total massa air yang dapat dilepas batubara yaitu sebesar 58,0121 gram. Namun, pada menit 9 hingga akhir didapatkan nilai laju pengeringan yang relatif sama pada tiap variasi kecepatan. Sehingga, pada menit 9 disarankan menggunakan kecepatan yang diturunkan perlahan dari 5 m/s dan 4 m/s untuk menghemat energi yang digunakan.
- Koefisien perpindahan panas pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai terbesar dibandingkan kecepatan 4 m/s dan 5 m/s pada *perforated plate* diameter 5 mm dengan nilai 110,86 W/m².K.
- 7. Koefisien perpindahan massa antara *perforated plate diameter* 5 mm dan 10 mm nilainya hampir sama, nilai paling besar terjadi pada kecepatan 6 m/s dengan nilai 0,06 m/s.

5.2 Saran

Berdasarkan eksperimen pengeringan yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa poin yang dapat penulis sarankan:

- 1. Proses penimbangan massa batubara sangat mempengaruhi nilai *moisture content* dan *drying rate*, sehingga dengan menggunakan timbangan dengan skala yang lebih kecil akan menghasilkan perhitungan yang semakin akurat.
- 2. Adanya perawatan alat eksperimen agar performa dan kualitas data yang dihasilkan lebih akurat
- 3. Melakukan kalibrasi dan beberapa pembaharuan alat ukur pada peralatan eksperimen.
- 4. Perhitungan perpindahan massa air pada sisi udara kurang stabil akibat keterbatasan alat RH meter, sehingga perhitungan dari sisi batubara akan lebih baik jika dijadikan sebagai acuan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Moran, M. J. & Shapiro, H. N., 2006. Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th edition. West Sussex: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Incropera, F.P. & Dewitt, D.P.,2008. *Fundamentals of Heat* and Mass Transfer 7th Edition. John Wiley & Sons Inc.
- [3] Sutar, Harekrushna dan Vikas Kumar,2012. The Effect of Distributor Design on Hydrodynamics of Conical Fluidized Bed Dryer. National Institute of Technology Rourkela, India.
- [4] Qusrini, Anbiya Katamsyi. 2017. Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Blade 10°, 30° dan 90° terhadap Kinerja Pengeringan Batubara pada Fluidized Bed Coal Dryer Tanpa Pengarah Aliran Berbentuk Cone. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia.
- [5] Kementrian Energi Sumber Daya Mineral. 2011. Jakarta, Indonesia.
- [6] Arifin, Achmad. 2015. Prinsip Kerja Boiler pada PLTU. <u>http://achmadarifin.com/prinsip-kerja-boiler-pada-pltu</u>. Diakses Februari 2018
- [7]Wikipedia. 2018. *Batubara*. <u>https://id.wikipedia.org/wiki/Batu_bara</u>. Diakses Februari 2018
- [8] ASHRAE. 2001. 2001 ASHRAE Fundamental Handbook. ASHRAE: Atlanta, GA.
- [9] Budi, Ginanjar Listantya. 2011. Hubungan Kecepatan Pengeringan (N) dengan Waktu Pengeringan (t).

https://tentangteknikkimia.wordpress.com/2011/12/17/dry ing/. Diakses Maret 2018

- [10] ASTM D 5142 Standart Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures
- [11]Engineering Toolbox. Coal Heating Value. www.engineeringtoolbox.com/coal-heating-value. Diakses Februari 2018

LAMPIRAN

Tabel A.1 Lembar data massa batubara *perforated plate* diameter 5 mm

	v = 4	m/s	v = 5	5 m/s	v = 6 m/s			
Monit	Massa	Massa	Massa	Massa	Massa	Massa		
wienit	Basah	Kering	Basah	Kering	Basah	Kering		
	Gr	gr	gr	gr	gr	gr		
0	11,895	8,865	11,895	8,658	11,895	8,583		
1	11,506	8,899	10,799	8,128	10,214	7,847		
2	11,264	8,986	10,872	8,461	10,719	8,476		
3	11,52	9,342	11,796	9,387	11,415	9,264		
4	11,862	9,78	10,58	8,683	11,042	9,182		
5	11,206	9,421	10,692	8,95	10,539	8,959		
7	11,364	9,624	11,36	9,646	11,493	9,923		
9	11,899	10,12	10,942	9,382	11,167	9,705		
11	11,251	9,643	11,911	10,221	10,343	9,036		
13	11,715	10,036	11,959	10,27	10,932	9,543		
15	11,444	9,811	10,371	8,956	11,06	9,655		

menit	massa batubara basah (gr)	massa batubara kering (gr)	massa wadah (gr)	moisture content (%)	drying rate (gr / menit)
0	11,895	8,865	2,466	32,13490296	0
1	11,506	8,899	2,517	29,00211369	9,398367793
2	11,264	8,986	2,548	26,13584213	8,598814695
3	11,52	9,342	2,456	24,02912621	6,320147747
4	11,862	9,78	2,53	22,31033005	5,156388499
5	11,206	9,421	2,721	21,03712434	3,81961713
7	11,364	9,624	2,574	19,79522184	1,862853741
9	11,899	10,12	2,481	18,8893608	1,358791567
11	11,251	9,643	2,454	18,27895874	0,915603094
13	11,715	10,036	2,477	18,17492964	0,156043646
15	11,444	9,811	2,45	18,15654881	0,027571242

Tabel A.2 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 4 m/s (diameter = 5 mm)

Tabel A.3 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 5 m/s (diameter = 5 mm)

menit	massa batubara basah	massa batubara kering	massa wadah	moisture content	drying rate
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(gr / menit)
0	11,895	8,658	2,466	34,33025772	0
1	10,799	8,128	2,146	30,86790708	10,38705189
2	10,872	8,461	2,177	27,72857964	9,417982322
3	11,796	9,387	2,137	24,94047003	8,364328847
4	10,58	8,683	2,14	22,47630332	7,392500131
5	10,692	8,95	2,154	20,40290466	6,220195968
7	11,36	9,646	2,179	18,66899031	2,600871533
9	10,942	9,382	2,141	17,72525849	1,415597719
11	11,911	10,221	2,162	17,33511129	0,5852208
13	11,959	10,27	2,189	17,28761515	0,071244218
15	10,371	8,956	2,181	17,27716728	0,015671807

menit	massa batubara basah	massa batubara kering	massa wadah	moisture content	drying rate
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(gr / menit)
0	11,895	8,583	2,466	35,12567611	0
1	10,214	7,847	2,199	29,53212726	16,78064653
2	10,719	8,476	2,139	26,14219114	10,16980836
3	11,415	9,264	2,15	23,21640583	8,777355941
4	11,042	9,182	2,14	20,89418108	6,966674236
5	10,539	8,959	2,149	18,83194279	6,186714882
7	11,493	9,923	2,163	16,82743837	3,006756627
9	11,167	9,705	2,189	16,28425039	0,814781972
11	10,343	9,036	2,145	15,94291291	0,512006226
13	10,932	9,543	2,153	15,82184759	0,181597972
15	11,06	9,655	2,161	15,78829082	0,050335157

Tabel A.4 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 6 m/s (diameter = 5 mm)

 Tabel A.5 Lembar data Temperatur dan Relative Humidity

 udara outlet perforated plate diameter 5 mm

	v = 4 m	n/s	v = 5 m	n/s	v = 6 m/s			
Menit	Temperatur	RH	Temperatur	RH	Temperatur	RH		
	°C	%	°C	%	°C	%		
0	48,4	15,8	49,5	14,5	49,7	14		
1	44,7	27,3	44,9	27,6	45,2	27,9		
2	45,0	24,8	45,1	25,1	45,4	25,2		
3	45,2	23,2	45,2	23,6	45,6	23,7		
4	45,4	21,6	45,4	22,3	45,7	22,5		
5	45,5	21,2	45,7	21,5	45,8	21,6		
6	45,6	18,8	45,8	19	46,0	19,1		
7	45,8	18	45,9	17,9	46,5	17,5		
8	45,9	17,7	46,1	17,4	46,7	16,6		
9	46	17,5	46,3	17,1	46,8	16,2		
10	46,1	17,2	46,6	16,8	47	16,1		

А	Q	V out perforated plate	waktu	T1	T2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ωinlet	massa udara kering	p udara	ṁ udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m³/s)	(m/s)	(mnt)	(inlet)	(outlet)	(%)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	(g uap air/kg dry air)	(g uap air/kg dry air)	kg dry air	(kg/m ³)	(kg/s)	(kg)	(g uap air/kg dry air)	(g)
0,00636172	0,02544688	2,950761744	0	47,2	47,2	15,8	15,8	24,9	75,0	10,65	10,650	1,6474	1,0905	0,02775	1,6650	0,0000	0,0000
0,00636172	0,02544688	2,950761744	1	47,2	44,7	15,8	27,3	27,6	87,1	16,30	10,650	1,6474	1,0905	0,02775	1,6650	5,6500	9,3081
0,00636172	0,02544688	2,950761744	2	47,2	45,0	15,8	24,8	26,9	84,0	15,00	10,650	1,6474	1,0905	0,02775	1,6650	4,3500	7,1664
0,00636172	0,02544688	2,950761744	3	47,2	45,2	15,8	23,2	26,5	82,0	14,15	10,650	1,6474	1,0905	0,02775	1,6650	3,5000	5,7661
0,00636172	0,02544688	2,950761744	4	47,2	45,4	15,8	21,6	26,1	80,0	13,30	10,650	1,6474	1,0905	0,02775	1,6650	2,6500	4,3657
0,00636172	0,02544688	2,950761744	5	47,2	45,5	15,8	21,2	26,0	79,6	13,10	10,650	1,6474	1,0905	0,02775	1,6650	2,4500	4,0362
0,00636172	0,02544688	2,950761744	7	47,2	45,6	15,8	18,8	25,1	76,1	11,70	10,650	3,2949	1,0905	0,02775	3,3300	1,0500	3,4596
0,00636172	0,02544688	2,950761744	9	47,2	45,8	15,8	18	24,9	75,2	11,28	10,650	3,2949	1,0905	0,02775	3,3300	0,6300	2,0758
0,00636172	0,02544688	2,950761744	11	47,2	45,9	15,8	17,7	24,9	74,9	11,13	10,650	3,2949	1,0905	0,02775	3,3300	0,4800	1,5815
0,00636172	0,02544688	2,950761744	13	47,2	46	15,8	17,5	24,8	74,9	11,06	10,650	3,2949	1,0905	0,02775	3,3300	0,4100	1,3509
0,00636172	0,02544688	2,950761744	15	47,2	46,1	15,8	17,2	24,8	74,6	10,93	10,650	3,2949	1,0905	0,02775	3,3300	0,2800	0,9226

Tabel A.6 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 4 m/s (d = 5 mm)

Tabel A.7 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 5 m/s (d = 5 mm)

А	Q	V out perforated plate	waktu	T1	Т2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ωinlet	massa udara kering	ρ udara	ṁ udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m³/s)	(m/s)	(mnt)	(inlet)	(outlet)	(%)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	(g uap air/kg dry air)	(g uap air/kg dry air)	kg dry air	(kg/m³)	(kg/s)	(kg)	(g uap air/kg dry air)	(g)
0,00636172	0,0318086	3,68845218	0	49,5	49,5	14,5	14,5	25,7	78,2	10,93	10,930	2,0755	1,0994	0,03497	2,0982	0,0000	0,0000
0,00636172	0,0318086	3,68845218	1	49,5	44,9	14,5	27,6	27,8	88,2	16,68	10,930	2,0755	1,0994	0,03497	2,0982	5,7500	11,9343
0,00636172	0,0318086	3,68845218	2	49,5	45,1	14,5	25,1	27,2	85,4	15,52	10,930	2,0755	1,0994	0,03497	2,0982	4,5900	9,5267
0,00636172	0,0318086	3,68845218	3	49,5	45,2	14,5	23,6	26,8	83,2	14,60	10,930	2,0755	1,0994	0,03497	2,0982	3,6700	7,6172
0,00636172	0,0318086	3,68845218	4	49,5	45,4	14,5	22,3	26,4	81,4	13,85	10,930	2,0755	1,0994	0,03497	2,0982	2,9200	6,0606
0,00636172	0,0318086	3,68845218	5	49,5	45,7	14,5	21,5	26,2	80,9	13,50	10,930	2,0755	1,0994	0,03497	2,0982	2,5700	5,3341
0,00636172	0,0318086	3,68845218	7	49,5	45,8	14,5	19	25,5	77,5	12,18	10,930	4,1511	1,0994	0,03497	4,1964	1,2500	5,1888
0,00636172	0,0318086	3,68845218	9	49,5	45,9	14,5	17,9	25,1	76,0	11,54	10,930	4,1511	1,0994	0,03497	4,1964	0,6100	2,5322
0,00636172	0,0318086	3,68845218	11	49,5	46,1	14,5	17,4	25,0	75,3	11,21	10,930	4,1511	1,0994	0,03497	4,1964	0,2800	1,1623
0,00636172	0,0318086	3,68845218	13	49,5	46,3	14,5	17,1	24,9	75,1	11,05	10,930	4,1511	1,0994	0,03497	4,1964	0,1200	0,4981
0,00636172	0,0318086	3,68845218	15	49,5	46,6	14,5	16,8	24,9	75,2	10,96	10,930	4,1511	1,0994	0,03497	4,1964	0,0300	0,1245

Α	Q	V out perforated plate	waktu	T1	Т2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ωinlet	massa udara kering	ρ udara	ṁ udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m²)	(m³/s)	(m/s)	(mnt)	(inlet)	(outlet)	(%)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	(g uap air/kg dry air)	(g uap air/kg dry air)	kg dry air	(kg/m³)	(kg/s)	(kg)	(g uap air/kg dry air)	(g)
0,00636172	0,03817032	4,426142616	0	49,7	49,7	14	14	25,6	77,7	10,68	10,680	2,4618	1,0864	0,04147	2,4881	0,0000	0,0000
0,00636172	0,03817032	4,426142616	1	49,7	45,2	14	27,9	28,1	89,7	17,12	10,680	2,4618	1,0864	0,04147	2,4881	6,4400	15,8540
0,00636172	0,03817032	4,426142616	2	49,7	45,4	14	25,2	27,4	85,9	15,58	10,680	2,4618	1,0864	0,04147	2,4881	4,9000	12,0628
0,00636172	0,03817032	4,426142616	3	49,7	45,6	14	23,7	27,0	84,2	14,82	10,680	2,4618	1,0864	0,04147	2,4881	4,1400	10,1919
0,00636172	0,03817032	4,426142616	4	49,7	45,7	14	22,5	26,6	82,4	14,08	10,680	2,4618	1,0864	0,04147	2,4881	3,4000	8,3701
0,00636172	0,03817032	4,426142616	5	49,7	45,8	14	21,6	26,3	81,2	13,58	10,680	2,4618	1,0864	0,04147	2,4881	2,9000	7,1392
0,00636172	0,03817032	4,426142616	7	49,7	46,0	14	19,1	25,5	77,5	12,10	10,680	4,9236	1,0864	0,04147	4,9762	1,4200	6,9915
0,00636172	0,03817032	4,426142616	9	49,7	46,5	14	17,5	25,2	76,1	11,36	10,680	4,9236	1,0864	0,04147	4,9762	0,6800	3,3481
0,00636172	0,03817032	4,426142616	11	49,7	46,7	14	16,6	24,9	75,1	10,86	10,680	4,9236	1,0864	0,04147	4,9762	0,1800	0,8862
0,00636172	0,03817032	4,426142616	13	49,7	46,8	14	16,2	24,8	74,8	10,71	10,680	4,9236	1,0864	0,04147	4,9762	0,0300	0,1477
0,00636172	0,03817032	4,426142616	15	49,7	47	14	16,1	24,9	74,9	10,69	10,680	4,9236	1,0864	0,04147	4,9762	0,0100	0,0492

Tabel A.8 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 6 m/s (d = 5 mm)

Tabel A.9 Perhitungan koefisien perpindahan massa dan panas (d = 5 mm)

MASS	TRANSFER	PERHIT	UNGAN

d = 5										
N	T∞	Kecepatan	D	Is	<u>RAs</u>	βÅ∞	hg	hí	hfg	hm.
INO	(°K)	(m/s)	(m)	(°K)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kj/kg)	(kj/kg)	(kj/kg)	(m/s)
1	321,4	4	0,007	312	1,0951	1,087	2588,2	202,020	2386180,00	0,044737
2	322,5	5	0,007	313	1,0941	1,0869	2590,1	206,620	2383480,00	0,056735
3	322,7	6	0,007	314	1,0926	1,0864	2590,5	207,460	2383040,00	0,065284

MASS TRANSFER EKSPERIMEN

d = 5								
N	T∞	Kecepatan	As	Na	RAS	βA∞	hm.	EDBOD (0/)
INO	(°K)	(m/s)	(m2)	(kg/s)	(kg/m ³)	(kg/m³)	(m/s)	ERROR (%)
1	321,4	4	0,448363	0,000157	1,0951	1,087	0,043130357	3,725
2	322,5	5	0,448363	0,000173	1,0941	1,0869	0,053626123	5,796
3	322,7	6	0,448363	0,000280	1,0926	1,0864	0,100608474	35,111
								14,877

HEAT TRANSFER

d = 5											
N.	T∞	Kecepatan	D	ρ	μ	ν	Re	R.	Nud	k	h
INO	(°K)	(m/s)	(m)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)	(m ² /s)				W/ m.K	W/m2.K
1	321,4	4	0,007	1,0905	0,00001947	1,78542E-05	1568,259	0,704	23,16211659	0,0278	91,986692
2	322,5	5	0,007	1,0994	0,000019522	1,7757E-05	1971,058	0,703	25,71353186	0,0279	102,486791
3	322,7	6	0,007	1,0864	1,95314E-05	1,79781E-05	2336,177	0,703	27,81661773	0,0279	110,869091

	v = 4	m/s	v = 5	m/s	v = 6	m/s
Monit	Massa	Massa	Massa	Massa	Massa	Massa
wenn	Basah	Kering	Basah	Kering	Basah	Kering
	gr	gr	gr	gr	gr	gr
0	11,895	8,865	11,895	8,658	11,895	8,583
1	11,506	8,899	10,799	8,128	10,214	7,847
2	11,264	8,986	10,872	8,461	10,719	8,476
3	11,52	9,342	11,796	9,387	11,415	9,264
4	11,862	9,78	10,58	8,683	11,042	9,182
5	11,206	9,421	10,692	8,95	10,539	8,959
6	11,364	9,624	11,36	9,646	11,493	9,923
7	11,899	10,12	10,942	9,382	11,167	9,705
8	11,251	9,643	11,911	10,221	10,343	9,036
9	11,715	10,036	11,959	10,27	10,932	9,543
10	11,444	9,811	10,371	8,956	11,06	9,655

 Tabel A.10 Lembar data massa batubara perforated plate

 diameter 10 mm

menit	massa batubara basah	massa batubara kering	massa wadah	moisture content	drying rate
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(% / menit)
0	10,382	7,78	2,466	32,87014	0
1	10,271	7,952	2,517	29,90714	8,888975
2	11,737	9,229	2,548	27,2935	7,840925
3	11,258	9,044	2,456	25,15337	6,420387
4	10,304	8,489	2,53	23,34705	5,41896
5	11,298	9,363	2,524	22,0538	3,879777
7	11,696	9,798	2,574	20,80684	1,870432
9	10,171	8,655	2,481	19,71391	1,63939
11	10,361	8,863	2,454	18,94524	1,153014
13	11,489	9,832	2,477	18,3866	0,837964
15	10,946	9,42	2,45	17,96139	0,637803

Tabel A.11 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 4 m/s (d = 10 mm)

Tabel A.12 Perhitungan	sisi	batubara	pada	kecepatan	5	m/s
$(\mathbf{d} = 10 \ \mathbf{mm})$						

menit	massa batubara basah	massa batubara kering	massa wadah	moisture content	drying rate (% / menit)
	(gr)	(gr)	(gr)	%	
0	10,382	7,837	2,466	32,15008	0
1	11,769	8,988	2,146	28,89951	9,751693
2	11,73	9,252	2,177	25,9395	8,880048
3	11,463	9,248	2,137	23,7508	6,566074
4	10,297	8,517	2,14	21,82175	5,787168
5	11,293	9,432	2,154	20,36328	4,37541
7	10,367	8,793	2,179	19,22325	1,710037
9	10,74	9,166	2,141	18,30445	1,378199
11	10,965	9,409	2,162	17,67579	0,942992
13	10,707	9,235	2,189	17,28105	0,592111
15	11,848	10,21	2,181	16,94424	0,505213

Tabel A.13 Perhitungan sisi batubara pada kecepatan 6 m/s (d = 10 mm)

menit	massa batubara basah (gr)	massa batubara kering (gr)	massa wadah (gr)	moisture content %	drying rate
0	10,382	7,767	2,466	33,03436	0
1	10,5	8,153	2,199	28,2737	14,28198
2	10,313	8,276	2,139	24,92048	10,05967
3	11,076	9,106	2,15	22,07036	8,55037
4	10,945	9,189	2,14	19,94321	6,381427
5	10,998	9,329	2,149	18,86089	3,246978
7	11,384	9,744	2,163	17,78549	1,613098
9	10,322	8,935	2,189	17,05398	1,097268
11	10,167	8,843	2,145	16,50461	0,824048
13	10,138	8,843	2,153	16,21791	0,430056
15	10,522	9,18	2,161	16,05071	0,250795

 Tabel A.14 Lembar data Temperatur dan Relative Humidity

 udara outlet perforated plate diameter 10 mm

	v = 4 m	/s	v = 5 m	n/s	v = 6	m/s
Menit	Temperatur	RH	Temperatur	RH	Temperatur	RH
	°C	%	°C	%	°C	%
0	47	15,8	49,6	15,2	49,7	15
1	44,5	27,2	45,0	27,8	45,1	28
2	44,8	23,9	45,2	25,4	45,4	25,9
3	44,9	22,9	45,3	23,9	45,5	24,2
4	45,1	21,5	45,5	22,5	45,6	22,8
5	45,3	20,8	45,7	21,5	45,7	21,7
6	45,4	18,9	45,8	19,5	45,9	18,8
7	45,6	18,7	46,1	18,4	46,4	18,1
8	45,7	18,3	46,2	18,1	46,6	17,7
9	45,9	18	46,4	17,8	46,7	17,4
10	46	17,8	46,5	17,6	46,9	17,1

A	Q	V out perforated plate	waktu	T1	Т2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ωinlet	massa udara kering	ρ udara	ṁ udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m³/s)	(m/s)	(mnt)	(inlet)	(outlet)	(%)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	p air/kg dr	o air/kg d	kg dry air	(kg/m³)	(kg/s)	(kg)	; uap air/kg dry ai	(g)
0,00636172	0,0254469	2,950761744	0	47	47	15,8	15,8	24,8	74,5	10,54	10,540	1,6472	1,0902	0,02774	1,6645	0,0000	0,0000
0,00636172	0,0254469	2,950761744	1	47	44,5	15,8	27,2	27,4	86,3	16,10	10,540	1,6472	1,0902	0,02774	1,6645	5,5600	9,1583
0,00636172	0,0254469	2,950761744	2	47	44,8	15,8	23,9	26,5	82,0	14,30	10,540	1,6472	1,0902	0,02774	1,6645	3,7600	6,1934
0,00636172	0,0254469	2,950761744	3	47	44,9	15,8	22,9	26,2	80,8	13,78	10,540	1,6472	1,0902	0,02774	1,6645	3,2400	5,3368
0,00636172	0,0254469	2,950761744	4	47	45,1	15,8	21,5	25,8	79,1	13,06	10,540	1,6472	1,0902	0,02774	1,6645	2,5200	4,1509
0,00636172	0,0254469	2,950761744	5	47	45,3	15,8	20,8	25,7	78,4	12,79	10,540	1,6472	1,0902	0,02774	1,6645	2,2500	3,7061
0,00636172	0,0254469	2,950761744	7	47	45,4	15,8	18,9	25,0	75,6	11,60	10,540	3,2943	1,0902	0,02774	3,3291	1,0600	3,4920
0,00636172	0,0254469	2,950761744	9	47	45,6	15,8	18,7	24,9	75,3	11,38	10,540	3,2943	1,0902	0,02774	3,3291	0,8400	2,7672
0,00636172	0,0254469	2,950761744	11	47	45,7	15,8	18,3	24,9	75,0	11,25	10,540	3,2943	1,0902	0,02774	3,3291	0,7100	2,3390
0,00636172	0,0254469	2,950761744	13	47	45,9	15,8	18	24,8	74,7	11,04	10,540	3,2943	1,0902	0,02774	3,3291	0,5000	1,6472
0,00636172	0,0254469	2,950761744	15	47	46	15,8	17,8	24,7	74,4	10,88	10,540	3,2943	1,0902	0,02774	3,3291	0,3400	1,1201

Tabel A.15 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 4 m/s (d = 10 mm)

Tabel A.16 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 5 m/s (d = 10 mm)

Α	Q	V out perforated plate	waktu	T1	Т2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ωinlet	massa udara kering	ρ udara	ṁ udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m³/s)	(m/s)	(mnt)	(inlet)	(outlet)	(%)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	p air/kg dı	o air/kg d	kg dry air	(kg/m³)	(kg/s)	(kg)	; uap air/kg dry ai	(g)
0,00636172	0,0318086	3,68845218	0	49,6	49,6	15,2	15,2	26,1	79,8	11,56	11,560	2,0493	1,0862	0,03455	2,0730	0,0000	0,0000
0,00636172	0,0318086	3,68845218	1	49,6	45,0	15,2	27,8	28,1	89,5	17,10	11,560	2,0493	1,0862	0,03455	2,0730	5,5400	11,3533
0,00636172	0,0318086	3,68845218	2	49,6	45,2	15,2	25,4	27,4	86,0	15,66	11,560	2,0493	1,0862	0,03455	2,0730	4,1000	8,4023
0,00636172	0,0318086	3,68845218	3	49,6	45,3	15,2	23,9	26,9	84,1	14,86	11,560	2,0493	1,0862	0,03455	2,0730	3,3000	6,7628
0,00636172	0,0318086	3,68845218	4	49,6	45,5	15,2	22,5	26,5	82,1	14,02	11,560	2,0493	1,0862	0,03455	2,0730	2,4600	5,0414
0,00636172	0,0318086	3,68845218	5	49,6	45,7	15,2	21,5	26,3	81,0	13,50	11,560	2,0493	1,0862	0,03455	2,0730	1,9400	3,9757
0,00636172	0,0318086	3,68845218	7	49,6	45,8	15,2	19,5	25,6	78,0	12,30	11,560	4,0987	1,0862	0,03455	4,1461	0,7400	3,0330
0,00636172	0,0318086	3,68845218	9	49,6	46,1	15,2	18,4	25,4	77,3	11,96	11,560	4,0987	1,0862	0,03455	4,1461	0,4000	1,6395
0,00636172	0,0318086	3,68845218	11	49,6	46,2	15,2	18,1	25,3	76,8	11,75	11,560	4,0987	1,0862	0,03455	4,1461	0,1900	0,7787
0,00636172	0,0318086	3,68845218	13	49,6	46,4	15,2	17,8	25,3	76,7	11,60	11,560	4,0987	1,0862	0,03455	4,1461	0,0400	0,1639
0,00636172	0,0318086	3,68845218	15	49,6	46,5	15,2	17,6	25,3	76,7	11,58	11,560	4,0987	1,0862	0,03455	4,1461	0,0200	0,0820

												1					
A	Q	V out perforated plate	waktu	T1	Т2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ωinlet	massa udara kering	ρ udara	ṁ udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m³/s)	(m/s)	(mnt)	(inlet)	(outlet)	(%)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	p air/kg dı	o air/kg d	kg dry air	(kg/m³)	(kg/s)	(kg)	; uap air/kg dry ai	(g)
0,00636172	0,0381703	4,426142616	0	49,7	49,7	15	15	26,0	79,7	11,45	11,450	2,4588	1,0859	0,04145	2,4869	0,0000	0,0000
0,00636172	0,0381703	4,426142616	1	49,7	45,1	15	28	28,3	90,3	17,30	11,450	2,4588	1,0859	0,04145	2,4869	5,8500	14,3840
0,00636172	0,0381703	4,426142616	2	49,7	45,4	15	25,9	27,6	87,1	16,04	11,450	2,4588	1,0859	0,04145	2,4869	4,5900	11,2859
0,00636172	0,0381703	4,426142616	3	49,7	45,5	15	24,2	27,1	84,6	15,03	11,450	2,4588	1,0859	0,04145	2,4869	3,5800	8,8025
0,00636172	0,0381703	4,426142616	4	49,7	45,6	15	22,8	26,7	82,9	14,31	11,450	2,4588	1,0859	0,04145	2,4869	2,8600	7,0322
0,00636172	0,0381703	4,426142616	5	49,7	45,7	15	21,7	26,4	81,4	13,66	11,450	2,4588	1,0859	0,04145	2,4869	2,2100	5,4339
0,00636172	0,0381703	4,426142616	7	49,7	45,9	15	18,8	25,4	77,3	11,97	11,450	4,9176	1,0859	0,04145	4,9739	0,5200	2,5571
0,00636172	0,0381703	4,426142616	9	49,7	46,4	15	18,1	25,4	77,0	11,74	11,450	4,9176	1,0859	0,04145	4,9739	0,2900	1,4261
0,00636172	0,0381703	4,426142616	11	49,7	46,6	15	17,7	25,3	76,8	11,58	11,450	4,9176	1,0859	0,04145	4,9739	0,1300	0,6393
0,00636172	0,0381703	4,426142616	13	49,7	46,7	15	17,4	25,3	76,8	11,49	11,450	4,9176	1,0859	0,04145	4,9739	0,0400	0,1967
0,00636172	0,0381703	4,426142616	15	49,7	46,9	15	17,1	25,4	77,0	11,46	11,450	4,9176	1,0859	0,04145	4,9739	0,0100	0,0492

Tabel A.17 Perhitungan sisi udara pengeringan pada kecepatan 6 m/s (d = 10 mm)

Tabel A.18 Perhitungan koefisien perpindahan massa dan panas (d = 10 mm)

MASS TRANSFER

d = 10										
N	Т	Kecepatan	D	Is	<u>rAs</u>	β₽∞	hg	hí	hfg	h.
INO	(°C)	(m/s)	(m)	(°K)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kj/kg)	(kj/kg)	(kj/kg)	(m/s)
1	321,5	4	0,007	312	1,1039	1,0957	2588,4	202,44	2385960	0,044636
2	322,6	5	0,007	313	1,0934	1,0862	2590,3	207,04	2383260	0,057145
3	322,7	6	0,007	314	1,0923	1,0859	2590,5	207,46	2383040	0,063411

MASS TRANSFER EKSPPERIMEN

d = 5								
Ne	T∞	Kecepatan	As	Na	<u>rAs</u>	øA∞	hm.	EROR
INO	(°K)	(m/s)	(m2)	(kg/s)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m/s)	(%)
1	321,5	4	0,448363	0,000148	1,1039	1,0957	0,040291085	10,783
2	322,6	5	0,448363	0,000163	1,0934	1,0862	0,050345673	13,506
3	322,7	6	0,448363	0,000238	1,0923	1,0859	0,082952183	23,557
								15.948

0 10	т	Kecepatan	D	0		v	Re	Pr	Nud	k	h
No	-	concolipation.		P	P	-		~~	60,0660		
	(°C)	(m/s)	(m)	(kg/m ³)	$(N.s/m^2)$	(m²/s)				W/ m.K	W/m2.K
					1,94748E-	1,78635E-					
1	321,5	4	0,007	1,0902	05	05	1567,44	0,703	23,14667589	0,0278	91,925370
					1,95267E-	1,79771E-					
2	322,6	5	0,007	1,0862	05	05	1946,92	0,703	25,56790626	0,027965	102,143785
					1,95314E-	1,79864E-					
3	322,7	6	0,007	1,0859	05	05	2335,10	0,703	27,81067618	0,02798	111,162451

4 m/s 6 m/s 5 m/s 10 mm 10 mm 10 mm 4 m/s 6 m/s 5 m/s 5 mm 5 mm 5 mm

Gambar A.1 Foto tampak atas proses eksperimen pengeringan batubara

BIOGRAFI PENULIS



Al Velian Suci Hadi Widarwis merupakan nama lengkap penulis tugas akhir ini. Penulis yang terlahir di Surabaya, Jawa timur pada tanggal 26 Januari 1995 ini merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Ayah Sulistyohadi Widarwis, dan Ibu Sumariyam.

Penulis memulai pendidikan formalnya dari TK Tunas Muda Surabaya, SD Khadijah Surabaya, SMP Negeri 22 Surabaya, SMA Negeri 15 Surabaya, dan D3 Teknik Mesin ITS.

Pada tahun 2016 penulis mengikuti ujian masuk Program Lintas Jalur Teknik Mesin ITS untuk melanjutkan pendidikan dan diterima sebagai mahasiswa di Jurusan S1 Teknik Mesin LJ, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya dengan NRP 2116 105 029.

Di Program Studi S1 Teknik Mesin, penulis mengambil bidang keahlian Konversi Energi dan mengambil tugas akhir dibidang yang sama dengan mata Perpindahan Panas, Termodinamika dan Teknik Pendingin.

Selain itu penulis juga aktif di berbagai kegiatan dalam kampus maupun luar kampus. Seperti pelatihan-pelatihan yang pernah diikuti oleh penulis selama menjadi mahasiswa, diantaranya adalah Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra-Tingkat Dasar (LKMM PraTD) FTI ITS, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Dasar (LKMM TD) HMDM ITS, Pelatihan Jurnalistik Tingkat Dasar (PJTD) HMDM ITS, *Private Class Autodesk Inventor Profesional level:essential*, ISO 50001:2011 *Awareness* dan lain-lain.

Untuk semua informasi dan masukan, dapat menghubungi penulis melalui e-mail : *alvelianwidarwis@gmail.com*