



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

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

NUGROHO TRI HUTOMO
NRP. 0211164500031

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



TUGAS AKHIR - TM141585

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

NUGROHO TRI HUTOMO
NRP. 02111645000031

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

JURUSAN 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 UPPER
FLUIDIZATION FOR COAL DRYER
PERFORMANCE**

NUGROHO TRI HUTOMO
NRP. 02111645000031

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 DIATAS 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

Oleh :

NUGROHO TRI HUTOMO
NRP. 021116 45 000031

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 196505051990037000
2. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, M.Eng. (Penguji I)
NIP. 195312191981030001
3. Ary Bachtiar Krishna Purandara, ST, M.Eng, Ph.D (Penguji II)
NIP. 197105241997021001
4. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsan, M.Eng. (Penguji III)
NIP. 195310191979031003

SURABAYA

JULI, 2018

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

Nama : Nugroho Tri Hutomo
NRP : 02111645000031
Jurusan / Fakultas : Teknik Mesin / Fakultas Teknologi
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

Abstrak

Bahan bakar PLTU pada umumnya adalah batubara. Batubara memiliki heating value yang bervariasi, mulai dari *low rank coal* hingga *high rank coal*. Sementara itu di Indonesia mayoritas batubara yang tersedia merupakan *low-medium rank coal*, sehingga memiliki *heating value* yang relatif rendah. Salah satu komponen pada PLTU adalah boiler. Boiler didesain untuk bahan bakar batu bara yang memiliki *heating value* tinggi. Ketika digunakan batubara dengan heating value rendah maka standby pulverizer juga beroperasi Apabila hal ini dilakukan secara terus menerus dan terjadi kerusakan pada salah satu pulverizer, maka tidak ada standby pulverizer yang dapat menggantikan, sehingga dapat berpengaruh terhadap reliability pulverizer dan menurunkan performa pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan kualitas batubara, dengan proses pengeringan menggunakan *fluidized bed coal dryer*. Proses pengeringan tersebut dapat menurunkan jumlah *moisture content* batubara sehingga dapat meningkatkan *heating valuenya*.

Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan alat praktikum pada penelitian sebelumnya, dimana ada modifikasi tipe *drying plate* yang digunakan pada alat *fluidized bed coal dryer*. Pelaksanakan eksperimen ini dilakukan dengan mengalirkan udara panas menuju *drying chamber* yang terisi butiran-butiran batu bara dengan berat total 300 gram. Pengeringan sampel batubara dilakukan selama 15 menit dengan interval pengambilan batubara setiap 1 menit pada menit ke 1-5 dan dilanjutkan dengan interval pengambilan batubara setiap 2 menit pada menit ke 7-15.

Kemudian, untuk mengetahui nilai moisture contentnya batubara yang telah diambil dari drying chamber akan dimasukkan ke oven dengan suhu 105°C selama 180 menit (ASTM D5142). Variasi yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada ukuran diameter lubang pada *drying plate* yaitu 5 mm dan 10 mm dengan tiga kecepatan fluidisasi (11 m/s, 12 m/s, 13 m/s).

Data yang didapatkan pada eksperimen ini adalah massa basah sampel batubara, massa kering sampel batubara, temperatur dan *relative humidity* pada *inlet* dan *outlet drying chamber*. Berdasarkan data-data tersebut didapatkan total massa air yang dapat dilepas batubara variasi kecepatan 11 m/s 12 m/s dan 13 m/s dengan *perforated plate* diameter 5 mm masing-masing yaitu sebesar 124.35 gram, 123.35gram dan 105.62 gram. Pada menit awal terjadi penurunan laju pengeringan yang signifikan pada masing-masing variasi, namun rata-rata *drying rate* paling baik dicapai dengan variasi kecepatan 13 m/s, kemudian sudut 12 m/s, dan kecepatan 11 m/s pada *perforated plate* diameter 5 mm . Besarnya nilai *drying rate* rata-rata pada kecepatan 11m/s, 12 m/s, 13 m/s menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm berturut-turut adalah 4,985 gr/menit, 5,115 gr/menit, 5,4155 gr/menit.

Kata kunci: *Perforated Plate* , *Fluidized Bed Coal Dryer*, Kecepatan Fluidisasi.

Experimental Study of Perforated Plate Diameter Effect (5 mm and 10 mm) and Air Velocity Upper Fluidization Towards Performance Coal Dryer

Name : ***Nugroho Tri Hutomo***
NRP : ***02111645000031***
Department / Faculty : ***Machine Engineering / Faculty of Industrial Technology***
Supervisor : ***Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng***

Abstract

General fuel of PLTU is coal. Coal has a variative heating value, from low rank coal to high rank coal. Meanwhile in Indonesia, the available coal is low-medium rank coal, so the heating value of it is low. One of component in PLTU is boiler. The boiler is designed for coal with high heating value. When the available coal type is the low one, the standby pulverizer is operated as well. If this activity is done continuously and malfunction is happening to one of the pulverizers, then there are no standby pulverize can be used. So, it will influenced of pulverizer reliability and the performance of the power plant. Therefore, it is necessary to improve the quality of coal, one way that can be done to improve the quality of the coal is the drying process using fluidized bed coal dryer, so it can reduce the amount of moisture content in the coal that can increase the value of heating.

The experiment is using the previous tool, which modified in the type of drying plate at the fluidized bed coal dryer. This experiment is done by carrying out the hot air into a drying chamber filled with coal grains with a total weight of 300 grams. Drying process of coal samples is done in 15 minutes with an interval every 1 minute until 5th minutes and continue with an interval every 2 minutes at 7th-15th minutes. To find the moisture content value of the coal which has been taken from drying chamber, the drying coal will be put into oven with the temperature

of 105°C for 180 minutes (ASTM D5142). The variety that is used in this experiment is on the size of hole drying plate diameter, which is 5 mm dan 10 mm with three varies of speed (11 m/s, 12 m/s, 13 m/s).

The data that has been obtained from the experiment are wet mass of coal samples, dry mass of coal samples, temperature, and relative humidity on inlet and outlet of the drying chamber. Based on these data, the total mass of removable coal mass of 11 m/s 12 m/s dan 13 m/s with 5 mm perforated plate are 124.35 grams, 123.35 grams dan 105.62 grams. In the early minutes, there's a significant decrease in every variation, but the best average of drying rate achieved with the variation of speed at 13 m/s and angle at 12 m/s, and speed at 11 m/s with the diameter of *perforated plate* at 5 mm. The average drying rate value in the speed of 11m/s, 12 m/s, 13 m/s with the diameter of *perforated plate* at 5 mm each, are 4,985 gr/minutes, 5,115 gr/ minutes, 5,4155 gr/ minutes.

Keywords: Perforated Plate , Fluidization Speed, Fluidized Bed Coal Dryer

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, petunjuk dan rizki-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam proses penyelesaian tugas akhir ini antara lain:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan ilmu-ilmu yang bermanfaat, saran, serta membimbing penulis. Terima kasih atas waktu dan kesabarannya dalam membimbing penulis.
2. Bapak Bambang Pramujati, ST. M.Sc. Eng Ph.D selaku Ketua Program Studi D3 Teknik Mesin. Terima kasih atas segala bantuan dan motivasinya.
3. Bapak Suwarno, ST. MSc. Ph.D., selaku koordinator tugas akhir Program St.udi D3 Teknik Mesin.
4. Bapak Dr. Sutikno, ST. MT., selaku dosen wali. Terima kasih atas saran dan masukan yang diberikan
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan D3 Teknik Mesin ITS.
6. Bapak Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME, Bapak Ary Bachtiar Khrisna Putra, ST. MT. PhD. dan Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichسانی, M.Eng, selaku dosen penguji. Terimakasih atas masukan dan saran yang diberikan.
7. Orang tua Bapak Suyitno dan Ibu Sri Endah Murwani, kedua kakak penulis Okvita Chandra Dewi dan Winy Febrianti yang tak pernah berhenti berdoa dan selalu

memberikan dukungan serta nasehat agar berusaha dan pantang menyerah. Terima kasih atas inspirasi dan kasih sayang yang selalu diberikan demi kesuksesan penulisan tugas akhir.

8. Bapak Melvin. Terima kasih atas segala bimbingan, ilmu dan referensi yang telah diberikan kepada penulis.
9. Rekan tugas akhir Al Velian Suci Hadi Widarwis, yang senantiasa bekerjasama, memotivasi, dan selalu menasihati. Terima kasih atas segala doa dan bantuannya.
10. Teman kelompok tugas akhir akhir. Renaldo, Ikki Adji, Baskoro, Sudi, Suluh dan Petra. Terima kasih atas kerjasama dan bantuannya.
11. Mas Erdien sebagai operator Lab. Teknik Pendingin & Pengkondisian Udara Teknik Mesin ITS yang sangat membantu dalam eksperimen untuk tugas akhir ini

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan masukan dari semua pihak. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

DAFTAR ISI

Abstrak	i
<i>Abstract</i>	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
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	8
2.3 <i>Fluidized Bed Coal Dryer</i>	11
2.4 Prinsip Perpindahan Panas dan Massa	14
2.4.1 Prinsip Perpindahan Panas	14
2.4.2 Prinsip Perpindahan Massa	17

2.5 Prinsip <i>Psychrometric</i>	18
2.6 Penelitian Terdahulu	24
BAB 3.....	27
METODOGI PENELITIAN	27
3.1 Instalasi Alat Eksperimen.....	27
3.2 Posisi Peletakan Alat Ukur.....	30
3.3 Variable Penelitian	31
3.4 Peralatan Penunjang	31
3.5 Metodologi Eksperimen	36
3.5.1 Studi Literatur	36
3.5.2 Tahap Persiapan Alat	36
3.5.3 Tahap Pengambilan Data	37
3.5.4 Tahap Analisis Data	38
3.5.5 Lembar Pengambilan Data	39
3.6 <i>Flowchart</i> Penelitian	41
3.7 <i>Flowchart</i> Eksperimen	42
3.8 Jadwal Penelitian.....	45
BAB 4 PEMBAHASAN	46
4.1 Data Hasil Percobaan	46
4.2 Contoh Perhitungan.....	46
4.2.1 Perhitungan Luasan Aliran Udara Pengering (V_p)	46
4.2.2 Kecepatan Minimum Fluidisasi (V_{min})	48

4.2.4 Perhitungan Mass Flow Rate Udara Pengeri ng .	51
4.2.5 Perhitungan Proses Pengeringan Pada Sisi Udara	52
4.2.6 Perhitungan Proses Pengeringan Pada Sisi Batubara	54
4.2.7 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas	55
4.2.8 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa	56
4.3 Analisis Hasil & Pembahasan Proses Pengeringan dari Sisi Udara Pada <i>Perforated Plate</i> Diameter 5 mm & 10 mm	59
4.3.1 Analisis Pada <i>Dry-bulb Temperature Outlet</i>	59
4.3.2 Analisis Pada <i>Relative Humidity</i>	63
4.3.3 Analisis Pada <i>Psychrometric Chart</i>	67
4.4 Analisis Hasil & Pembahasan Proses Pengeringan dari Sisi Batubara Pada <i>Perforated</i> Diameter 5 mm & 10 mm.....	72
4.4.1 Analisis Pada <i>Moisture Content</i> Batubara	72
4.4.2 Analisa Pada <i>Drying Rate</i> Batubara	76
4.5 Analisis Hasil & Pembahasan Pengaruh Kecepatan Pengeringan Terhadap Koefisien Perpindahan Panas pada <i>Perforated</i> Diameter 5 mm & 10 mm.....	80
4.6 Analisis Hasil & Pembahasan Pengaruh Kecepatan Pengeringan Terhadap Koefisien Perpindahan	

Massa pada Perforated Diameter 5 mm & 10 mm.....	82
4.5 Analisis Hasil & Pembahasan Perbandingan Massa Air Total Terhadap Kecepatan Udara pada Perforated Diameter 5 mm & 10 mm.....	84
BAB 5.....	87
PENUTUP.....	87
5.1 Kesimpulan.....	87
5.2 Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA	91
LAMPIRAN	93
Tabel A.1 Lembar data massa batubara variasi <i>perforated plate</i> diameter 5 mm.....	93
Tabel A.2 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 11 m/s (d5).....	94
Tabel A.3 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 12 m/s (d5).....	94
Tabel A.4 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 13 m/s (d5).....	95
Tabel A.5 Lembar data Temperatur dan <i>Relative Humidity</i> udara <i>outlet</i> (d5)	95
Tabel A.6 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 11 m/s (d 5 mm).....	96
Tabel A.7 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 12 m/s (d 5 mm).....	96

Tabel A.8 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 13 m/s (d 5 mm).....	97
Tabel A.9 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas (d 5 mm)	97
Tabel A.10 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 5 mm)	97
Tabel A.11 Validasi Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 5 mm).....	98
Tabel A.12 Lembar data massa batubara variasi <i>perforated plate</i> diameter 10 mm.....	99
Tabel A.13 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 11 m/s (d 10 mm)....	100
Tabel A.14 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 12 m/s (d 10 mm)....	100
Tabel A.15 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 13 m/s (d 10 mm)....	101
Tabel A.16 Lembar data Temperatur dan <i>Relative Humidity</i> udara <i>outlet</i> (d 10 mm)	101
Tabel A.17 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 11 m/s (d 10 mm).....	102
Tabel A.18 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 12 m/s (d 10 mm).....	102
Tabel A.19 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 13 m/s (d 10 mm).....	103
Tabel A.20 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas (d 10 mm)	103

Tabel A.21 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 10 mm)	103
103	
Tabel A.22 Validasi Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 10 mm).....	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema pembangkit listrik tenaga uap	1
Gambar 1.2 Pulverizer.....	3
Gambar 2.1 Grafik laju pengeringan.....	9
Gambar 2.2 Drying chamber	11
Gambar 2.3 Nilai koefisien drag berdasarkan bentuknya	12
Gambar 2.4 Skema aliran udara pengering	13
Gambar 2.5 Ilustrasi proses pengeringan batubara.....	14
Gambar 2.6 Psychrometric chart	22
Gambar 2.7 Pengaruh kecepatan fluidisasi terhadap moisture content	24
Gambar 2.8 Design of plate (a) dutch wave mesh, (b) perforated plate, (c) punched plate	25
Gambar 2.9 Grafik penelitian moisture content fungsi waktu pada kecepatan 1,5 m/s.....	26
Gambar 3.1 Instalasi peralatan fluidized bed coal dryer	27
Gambar 3.2 Skema instalasi peralatan fluidized bed coal dryer..	28
Gambar 3.3 (a) dimensi perforated plate diameter 5mm (b) dimensi perforated plate diameter 10 mm	29
Gambar 3.4 Posisi peletakan themocouple dan rh meter	30
Gambar 3.5 (a) thermocouple, (b) data akusisi, (c) rh meter, (d) thermocontrol (e) toolkit, (f) kompor dan gas LPG, (g) heater, (h) timbangan beban dan timbangan digital, (i) oven, (j) anemometer	33
Gambar 3.6 Flowchart penelitian	41
Gambar 3.7 Flowchart eksperimen ke-1	45
Gambar 4.1 (a) dimensi perforated plate diameter 5mm (b) dimensi perforated plate diameter 10 mm	47
Gambar 4.2 Free-body diagram.....	48
Gambar 4.3 Drying Chamber	50
Gambar 4.4 Kondisi udara inlet dan outlet menit ke-1 pada kecepatan fluidisasi 13 m/s dan diameter perforated plate 5 mm	53
Gambar 4.5 Grafik <i>dry bulb temperatur outlet vs drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 5 mm.....	59

Gambar 4.6 Grafik <i>dry bulb temperatur outlet vs drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 10 mm	60
Gambar 4.7 Grafik <i>dry bulb temperatur outlet vs drying time</i> pada kecepatan udara 11 m/s	62
Gambar 4.8 Grafik <i>dry bulb temperatur outlet vs drying time</i> pada kecepatan udara 13 m/s	62
Gambar 4.9 Grafik <i>relative humidity vs drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 5 mm	64
Gambar 4.10 Grafik <i>relative humidity vs drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 10 mm	64
Gambar 4.11 Grafik <i>relative humidity vs drying time</i> pada kecepatan udara 11 m/s	66
Gambar 4.12 Grafik <i>relative humidity vs drying time</i> pada kecepatan udara 13 m/s	66
Gambar 4.13 Kondisi udara outlet beberapa menit pengeringan berdasarkan <i>psychrometric chart</i> pada diameter 5 mm.....	68
Gambar 4.14 Kondisi udara outlet pada beberapa menit pengeringan berdasarkan <i>psychrometric chart</i> pada diameter 10 mm.....	68
Gambar 4.15 Kondisi udara outlet pada beberapa menit pengeringan berdasarkan <i>psychrometric chart</i> pada kecepatan 11 m/s	70
Gambar 4.16 Kondisi udara outlet pada beberapa menit pengeringan berdasarkan <i>psychrometric chart</i> pada kecepatan 13 m/s	70
Gambar 4.17 Grafik <i>moisture content vs drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 5 mm	72
Gambar 4.18 Grafik <i>moisture content vs drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 10 mm	72
Gambar 4.19 Grafik <i>moisture content vs drying time</i> pada kecepatan udara 11 m/s	74
Gambar 4.20 Grafik <i>moisture content vs drying time</i> pada kecepatan udara 13 m/s	74
Gambar 4.21 Grafik <i>drying rate vs drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 5 mm.....	76

Gambar 4.22 Grafik <i>drying rate</i> vs <i>drying time</i> pada <i>perforated plate</i> diameter 10 mm.....	76
Gambar 4.23 Grafik <i>drying rate</i> vs <i>drying time</i> pada kecepatan udara 11 m/s	78
Gambar 4.24 Grafik <i>drying rate</i> vs <i>drying time</i> pada kecepatan udara 13 m/s	79
Gambar 4.25 Grafik <i>heat transfer coefficient</i> vs kecepatan udara.....	81
Gambar 4.26 Grafik <i>mass transfer coefficient</i> vs kecepatan udara.....	82
Gambar 4.27 Grafik perbandingan massa air total vs kecepatan udara pada <i>perforated plate</i> diameter 5 mm.....	84
Gambar 4.28 Grafik perbandingan massa air total vs kecepatan udara pada <i>perforated plate</i> diameter 10 mm.....	85

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data Kualitas Batubara	2
Tabel 2.1 Komposisi dan parameter fisik dari beberapa macam batubara.....	7
Tabel 3.1 Tahap analisis data	39
Tabel 3.2 Lembar pengambilan data	40
Tabel 3.3 Jadwal penelitian.....	45

(halaman ini sengaja dikosongkan)

digunakan untuk menggerakkan turbin, kemudian turbin akan *dicouple* dengan generator, sehingga menghasilkan energi listrik.

Tabel 1.1 Data Kualitas Batubara

Coal Grade	Heating Value	
	(Btu/lb)	(kJ/kg)
Anthracite	12910	30080
Semi-Anthracite	13770	32084
Low-volatile bituminous	14340	33412
Medium-volatile bituminous	13840	32247
High-volatile bituminous A	13090	30499
High-volatile bituminous B	12130	28262
High-volatile bituminous C	10750	25047
Sub-bituminous B	9150	21319
Sub-bituminous C	8940	20830
Lignite	6900	16077

(Source: www.engineeringtoolbox.com/coal-heating-values)^[7]

Tabel 1.1 menunjukkan data kualitas berbagai jenis batu bara berdasarkan *heating value*nya, yaitu dari *low rank coal* (lignit), *sub-bituminous* hingga jenis high rank coal seperti *anthracite*. Batubara memiliki heating value yang bervariasi, mulai dari *low rank coal* hingga *high rank coal*. Sementara itu di Indonesia mayoritas batubara yang tersedia merupakan *low-medium rank coal*, sehingga heating value-nya relatif rendah.



Gambar 1.2 *Pulverizer*

Gambar 1.2 menunjukkan ada beberapa *pulverizer* pada suatu PLTU.

Sebelum batubara memasuki *boiler*, batubara terlebih dahulu dihancurkan menggunakan *pulverizer*. *Pulverizer* ini bekerja secara kontinu untuk memenuhi pasokan batubara ke dalam *boiler*. Ketika batu bara yang tersedia dengan *heating value* rendah maka *standby pulverizer* akan ikut bekerja untuk mensuplai batu bara yang akan digunakan pada boiler, sehingga daya yang dibutuhkan pada pulverizer lebih tinggi. Apabila hal ini dilakukan secara terus menerus dan terjadi kerusakan pada salah satu pulverizer maka tidak ada *standby pulverizer* yang dapat menggantikan sehingga dapat berpengaruh terhadap *reliability* pulverizer, kemudian berdampak pada performa pembangkit. Oleh karena itu, maka diperlukan peningkatan kualitas batubara, salah satunya yaitu dengan proses pengeringan menggunakan *fluidized bed coal dryer*. Proses pengeringan tersebut dapat menurunkan jumlah *moisture content* batubara sehingga dapat meningkatkan *heating value*nya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh ukuran diameter *perforated plate* di atas kecepatan fluidisasi terhadap karakteristik pengeringan pada batubara ?
2. Bagaimana pengaruh nilai *Reynolds Number* terhadap *drying rate* pada batubara di atas kecepatan fluidisasi?
3. Bagaimana perubahan karakteristik udara pengering yang dilihat dari *psychrometric chart* ?
4. Bagaimana hubungan perpindahan panas dan massa pada pengeringan batubara ?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Beban pengeringan batubara untuk tiap variasi sama yaitu seberat 300 gram.
2. Diameter batubara berukuran ± 7 mm dan berbentuk bola.
3. *Perforated plate* dengan diameter berbeda akan tetapi memiliki *open area* yang sama.
4. *Heat loss* pada dinding chamber ke lingkungan diabaikan.
5. Proses pengeringan berlangsung secara *steady state*.
6. Percobaan penelitian dilakukan pada temperatur ruangan (27°C)
7. Alat ukur telah terkalibrasi

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh ukuran diameter *perforated plate* pada kecepatan fluidisasi terhadap *drying rate* batubara di atas kecepatan fluidisasi
2. Mengetahui pengaruh nilai *Reynolds Number* terhadap *drying rate* pada batubara di atas kecepatan fluidisasi.

3. Mengetahui proses pengeringan yang dilihat dari *psychrometric chart*.
4. Mengetahui proses perpindahan panas dan massa pada pengeringan batubara.

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 penelitian selanjutnya.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara merupakan salah satu sumber energi fosil 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 dengan komponen utama berupa karbon. Beberapa jenis batubara dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 2.1 Komposisi dan parameter fisik dari beberapa macam batubara

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

(Source: James G Speight. 2005. Handbook of Coal Analysis)^[5]

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

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

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

$$\%MC = \frac{m_b - m_k}{m_b} \times 100\% \quad (2.1)$$

dengan:

m_b = massa batubara basah

m_k = massa batubara kering

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.

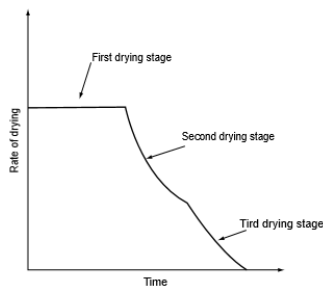
2.2 Mekanisme Pengeringan

Pengeringan merupakan proses pengambilan sejumlah cairan yang terkandung dalam suatu bahan dengan menggunakan media udara atau gas yang dilewakan melalui bahan 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.

Terdapat dua jenis *moisture* pada bahan yaitu *moisture* terikat dan *moisture* bebas. Untuk menghilangkan *moisture* bebas pada bahan dapat dilakukan dengan cara evaporasi dan vaporisasi. Evaporasi terjadi ketika *vapor pressure* dari *moisture* pada permukaan benda sama dengan tekanan atmosfer. Sedangkan vaporisasi terjadi ketika *vapor pressure* saturasi dari *moisture* pada benda lebih rendah dibanding tekanan atmosfer. Vaporisasi dilakukan dengan cara melewati udara panas pada batubara sehingga terjadi proses konveksi antara udara pengering dengan benda. Temperature udara pengering akan menurun akibat perpindahan panas dan *moisture* dari benda akan dibawa oleh udara pengering.

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
(Source: Treybal, 1981. Hubungan antara Kecepatan Pengeringan dan Waktu)

Proses pengeringan pada bahan dibedakan menjadi 3 tahap, yaitu:

1. *First Drying Stage*

Tahap pengeringan ini ditandai dengan laju pengeringan yang bernilai konstan. Pada tahap ini terjadi pengurangan jumlah *moisture content* akibat penguapan air pada permukaan bahan. Umumnya tidak terjadi *first drying stage* pada proses pengeringan karena tahap ini hanya dapat terjadi pada benda dengan permukaan yang sepenuhnya basah. Walaupun tahap ini dapat terjadi pada beberapa proses pengeringan, namun tahap ini sulit terdeteksi karena prosesnya yang sangat singkat.

2. *Second Drying Stage*

Pada tahap ini, besarnya nilai laju pengeringan per satuan area permukaan basah adalah konstan. Namun, berdasarkan gambar 2.1 dapat terlihat bahwa pada tahap ini terjadi penurunan nilai laju pengeringan terhadap waktu. Hal ini dapat terjadi karena adanya beberapa daerah kering pada permukaan benda akibat hilangnya *moisture content* pada area permukaan tersebut. Tahap ini akan berakhir saat seluruh *moisture content* pada permukaan film telah menguap.

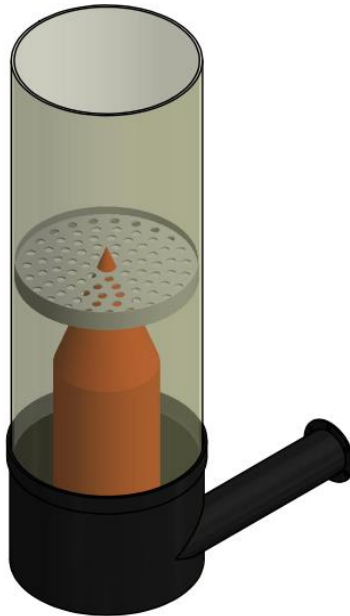
3. *Third Drying Stage*

Sama seperti *second drying stage*, tahap ini ditandai dengan turunnya nilai laju pengeringan pada bahan terhadap waktu, namun penurunan nilai laju pengeringan lebih cepat dibandingkan tahap sebelumnya. Pada tahap ini, besarnya nilai laju pengeringan dikontrol oleh besarnya nilai difusi *moisture content* dari dalam benda menuju permukaan. Tahap ini akan berlangsung hingga

moisture content mencapai kesetimbangan dengan kelembaban udara pengering dan kemudian proses pengeringan berhenti.

2.3 *Fluidized Bed Coal Dryer*

Fluidized bed coal dryer biasa digunakan pada pengeringan partikel basah yang berbentuk granular. Pada *fluidized bed coal dryer* ini, sistem berkerja dengan cara melewatkan aliran gas panas melalui sisi bawah *drying chamber* dengan menggunakan blower. Kemudian pada bagian tengah *drying chamber* terdapat sebuah *distributor plate* dengan open area tertentu 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*. *Drag* yaitu hambatan dari aliran fluida pada suatu benda. Perbedaan antara tekanan tinggi di daerah stagnasi di depan dengan tekanan di daerah belakang memberikan sumbangan seretan yang besar, sehingga menimbulkan gaya drag.

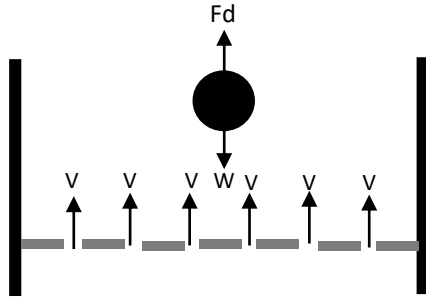
Berikut ini adalah nilai koefisien drag berdasarkan bentuknya :

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

Gambar 2.3 Nilai koefisien *drag* berdasarkan bentuknya
 (Source: Si Putu Gede Gunawan Tista, 2009. Pengaruh Variasi Jarak Penghalang Berbentuk Segitiga di Depan Silinder Terhadap Koefisien Drag)

Untuk memperoleh nilai kecepatan minimum fluidisasi digunakan hukum pertama Newton dengan persamaan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Skema aliran udara pengering

$$\sum F_y = 0 \quad (2.2)$$

$$Fd - W = 0 \quad (2.3)$$

$$Fd = W \quad (2.4)$$

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

$$V = \sqrt{\frac{2 \rho_{batubara} \forall g}{Cd \rho_{udara} A}} \quad (2.6)$$

dengan :

Fd = Drag Force (kg m/s²)

W = Berat batubara (kg m/s²)

Cd = Koefisien drag batubara

A = Cross Sectional Area (m²)

V = Kecepatan fluidisasi minimum (m/s)

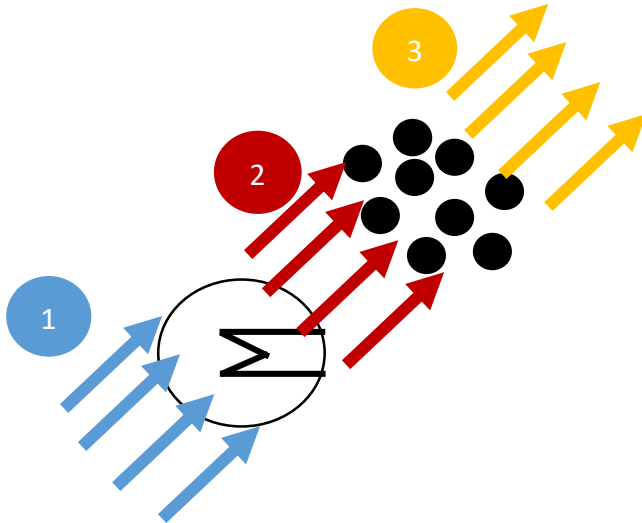
\forall = Volume batubara (m³)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

ρ = massa jenis (kg/m³)

2.4 Prinsip Perpindahan Panas dan Massa

Ilustrasi proses pengeringan pada eksperimen ini ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 2.5 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 dilakukannya 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 dinyatakan [2] :

$$Q = \bar{h} \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_s) \quad (2.7)$$

dengan :

Q = laju perpindahan panas (W)

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)

A = luas permukaan batubara (m²)

T_{∞} = temperatur udara pengering (K)

T_s = temperatur permukaan batubara (K)

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 antara fluida dengan batubara menurut *Hilpert* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ^[2] :

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k_f} \quad (2.8)$$

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* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut [2] :

$$Nu = f(x^*, Re)Pr^n \quad (2.9)$$

Untuk aliran yang melewati permukaan bola nilai *nusselt number* (Nu_D) dari aliran tersebut menurut *Ranz-Marshall* adalah [2] :

$$Nu_D = 2 + ((0.6Re_D^{1/2}) \cdot Pr^{1/3}) \quad (2.10)$$

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

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.11)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (2.12)$$

dengan:

Pr = *Prandtl number*

ν = viskositas kinematik udara pengering (m²/s)

α = diffusivitas panas

Re = *Reynold number*

ρ = massa jenis udara pengering (kg/m³)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

D = diameter batubara (m)

μ = viskositas absolut udara pengering (Ns/m²)

Dari persamaan *Prandtl Number* diketahui bahwa semakin besar nilai difisivitas 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 Reynold 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. Molar *flux moisture content* ini dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ^[2] :

$$N''_A = h_m \cdot (C_{A,S} - C_{A,\infty}) \quad (2.13)$$

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

$$n_A = h_m \cdot A_S (\rho_{A,S} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.14)$$

dengan :

- N''_A = molar *flux* (kg mol /s.m²)
- 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/m³)
- $C_{A,\infty}$ = konsentrasi uap air medium pengering (kg mol/m³)
- $\rho_{A,S}$ = massa jenis uap air jenuh pada permukaan batubara (kg/m³)
- $\rho_{A,\infty}$ = massa jenis uap air udara pengering (kg/m³)

Perpindahan massa yang terjadi pada saat proses dipengaruhi oleh perpindahan panas yang diterima batubara. Persamaan yang digunakan yaitu sebagai berikut:

$$Q = h \cdot A_S \cdot (T_S - T_\infty) = n_A \cdot h_{fg} \quad (2.15)$$

$$h \cdot A_S \cdot (T_S - T_\infty) = h_m \cdot A_S \cdot (\rho_{A_S} - \rho_{A_\infty}) \cdot h_{fg} \quad (2.16)$$

$$\frac{h}{h_m} = \frac{h_{fg}(\rho_{A_S} - \rho_{A_\infty})}{(T_S - T_\infty)} \quad (2.17)$$

$$h_m = \frac{h(T_S - T_\infty)}{h_{fg}(\rho_{A_S} - \rho_{A_\infty})} \quad (2.18)$$

dengan:

- h = koefisien perpindahan panas (W/m²K)
- A_S = luas permukaan batubara (m²)
- h_{fg} = *evaporation enthalpy* (kJ/Kg)

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. Beberapa istilah-

istilah yang sering digunakan dalam proses pengeringan antara lain yaitu:

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. *Moisture Content*

Kadar air (*Moisture Content*) adalah perbandingan berat air yang terkandung dalam suatu bahan dengan berat kering bahan tersebut. Untuk menentukan berat kering suatu bahan, penimbangan dilakukan setelah bobot tersebut tidak berubah lagi selama pengeringan. Nilai kadar air biasanya dinyatakan dalam persen (%). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut ^[1] :

$$MC (\%) = \frac{m_{Sc,basah} - m_{Sc,kering}}{m_{c,basah}} \times 100\% \quad (2.19)$$

dengan :

MC (%) = kadar air suatu bahan basis basah (%).

$m_{Sc, basah}$ = massa sampel batubara awal dalam keadaan basah (kg).

$m_{Sc, kering}$ = massa sampel batubara akhir dalam keadaan kering (kg).

4. *Relative Humidity* (ϕ)

Relative humidity menunjukkan 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] :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (2.20)$$

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] :

$$\gamma = \frac{M_w}{M_w + M_{da}} \quad (2.21)$$

dengan :

M_w = massa uap air

M_{da} = massa 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] :

$$d_v = \frac{M_w}{V} \quad (2.22)$$

dengan :

M_w = massa uap air

V = volume total sampel

5. *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 ^[1] :

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{m_w}{m_{da}} = \frac{P_w V / R_w T}{P_{da} V / R_{da} T} = \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right) \left(\frac{R_{da}}{R_w} \right) = \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right) \left(\frac{M_w}{M_{da}} \right) \\ &= \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right) \left(\frac{18}{28.96} \right) \\ \omega &= 0.622 \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right)\end{aligned}\tag{2.23}$$

dengan :

ω = rasio kelembaban (kg uap air/kg udara kering)

m_w = massa uap air (kg)

m_{da} = massa udara kering (kg)

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)

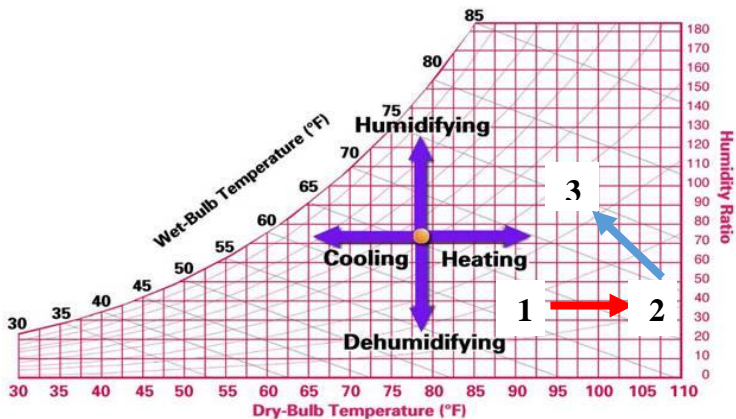
Sesuai dengan hukum Dalton bahwa besarnya tekanan atmosfer merupakan penjumlahan antara tekanan parsial udara

kering dan tekanan parsial uap air $P = P_{da} + P_w$, sehingga persamaan rasio kelembaban dapat ditulis sebagai berikut ^[1]:

$$\omega = 0.622 \left(\frac{P_w}{P - P_w} \right) \quad (2.24)$$

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* ditunjukkan pada gambar 2.5:



Gambar 2.6 *Psychrometric chart*

1. 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* ditunjukkan pada garis horizontal dengan arah ke kanan sedangkan proses pendinginan ditunjukkan 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* ditunjukkan pada garis vertikal dengan arah ke atas, sedangkan dehumidifikasi ditunjukkan pada garis vertikal dengan arah ke bawah.

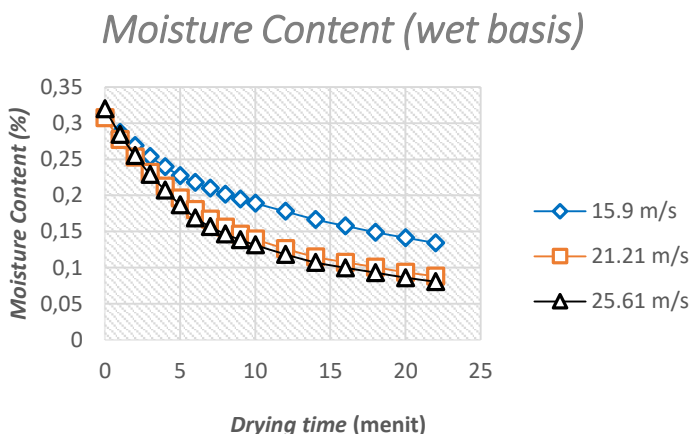
Proses pengeringan batubara pada *fluidized bed coal dryer* ini ditunjukkan pada gambar 2.6. Proses 1 ke 2 merupakan proses pemanasan udara pengering yang ditandai dengan arah panah ke kanan. Pada proses pemanasan udara ini disebut sebagai *sensible heating* di mana terjadi kenaikan nilai *dry bulb temperature* 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 menunjukkan terjadinya *sensible cooling process* pada udara pengering akibat panas yang berpindah ke batubara, sedangkan tanda arah

panah ke atas menunjukkan terjadinya *humidification process* pada udara pengering akibat berpindahnya uap air dalam batubara ke udara pengering.

2.6 Penelitian Terdahulu

a. Alim Jabar Ibrahim (2015)

Penelitian yang telah dilakukan oleh Ali Jabbar Ibrahim ini berjudul **Studi Eksperimen Pengaruh Kecepatan Fluidisasi dan Jenis Bed Pengeringan Terhadap Unjuk Kerja *Swirling Fluidized Bed Coal Dryer Tanpa Pengarah Aliran Berbentuk Cone***. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan fluidisasi terhadap laju pengeringan batubara dengan variasi kecepatan 15,6 m/s, 21,21 m/s 25,61 m/s. Dari penelitian tersebut didapatkan jumlah *moisture content* tiap interval waktu tertentu selama proses pengeringan untuk masing-masing sudut *blade* dan dapat ditunjukkan pada grafik berikut ^[3]:

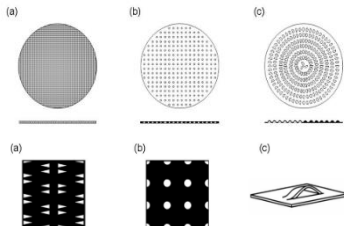


Gambar 2.7 Pengaruh kecepatan fluidisasi terhadap *moisture content*

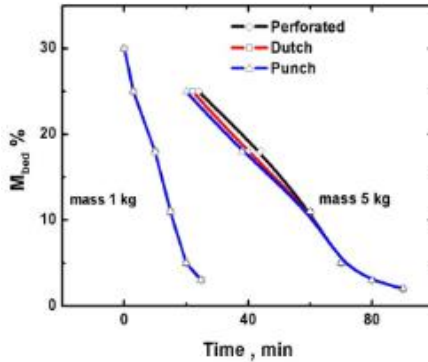
Trendline grafik di atas menunjukkan jumlah *moisture content* yang menurun terhadap fungsi waktu. *Moisture content* mengalami penurunan yang signifikan hingga menit ke-10 hal ini dikarenakan jumlah *moisture content* pada permukaan batubara telah berkurang dan hanya tersisa pada bagian pori-pori batubara. Selain itu, diketahui bahwa kecepatan fluidisasi juga mempengaruhi jumlah *moisture content* tiap menit pada proses pengeringan tersebut. Pengeringan batubara dengan menggunakan kecepatan *fluidisasi* 25,61 m/s mengalami penurunan jumlah *moisture content* yang paling signifikan jika dibandingkan dengan kecepatan fluidisasi 15,6 m/s, 21,21 m/s. Sehingga dapat dikatakan bahwa dengan semakin tinggi kecepatan fluidisasi yang digunakan maka laju pengeringan akan semakin cepat.

b. 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 penelitian tentang pengeringan *placebo granular* (kapsul obat) dengan berat 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 2.9 [4]. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil penelitian yang tunjukan pada grafik gambar 2.10 [4]



Gambar 2.8 Design of plate (a) dutch wave mesh, (b) perforated plate, (c) punched plate



Gambar 2.9 Grafik penelitian moisture content fungsi waktu pada kecepatan 1,5 m/s

Pada Gambar 2.9 menunjukkan trendline dari moisture content terhadap fungsi waktu. Saat beban pengeringan 1 kg, kurva antara ketiga variasi *plate* berbentuk sama. Hal ini disebabkan karena beban pengeringan yang relatif kecil. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa dengan kecepatan 1,5 m/s dan beban pengeringan 5 kg terjadi penurunan *moisture content* yang sedikit berbeda, dimana laju pengeringan 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 menggunakan desain *punched plate*, aliran gas lebih terpusat pada kecepatan gas rendah. Namun seiring dengan meningkatnya kecepatan gas, dapat menyebabkan gas meresap ke seluruh permukaan bed sehingga menghasilkan kontak antara gas dengan bed yang yang lebih merata.

BAB 3

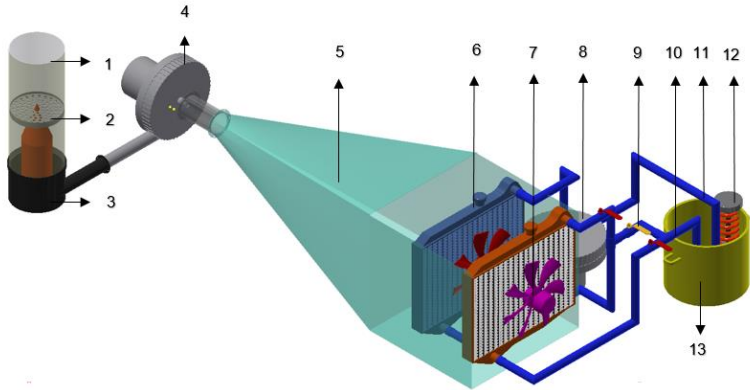
METODOGI PENELITIAN

3.1 Instalasi Alat Eksperimen

Pelaksanaan eksperimen ini dilakukan berdasarkan pada penelitian Alim Jabar & Anbiya (2017) dengan mengubah desain *drying chamber*. Perubahan desain terletak pada pengarah aliran udara, dimana yang sebelumnya berbentuk *blade* dengan kemiringan sudut tertentu diubah menjadi *perforated plate* dengan variasi diameter. Media pengering yang digunakan pada eksperimen ini berupa udara bertemperatur 50°C yang dihasilkan dari proses perpindahan panas antara air dan udara *ambient* pada *heat exchanger*. Besarnya *massflow rate* dan temperatur udara pengering yang masuk ke dalam *drying chamber* dianggap konstan. Instalasi peralatan *fluidized bed coal dryer* ditunjukkan pada gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3.1 Instalasi peralatan *fluidized bed coal dryer*



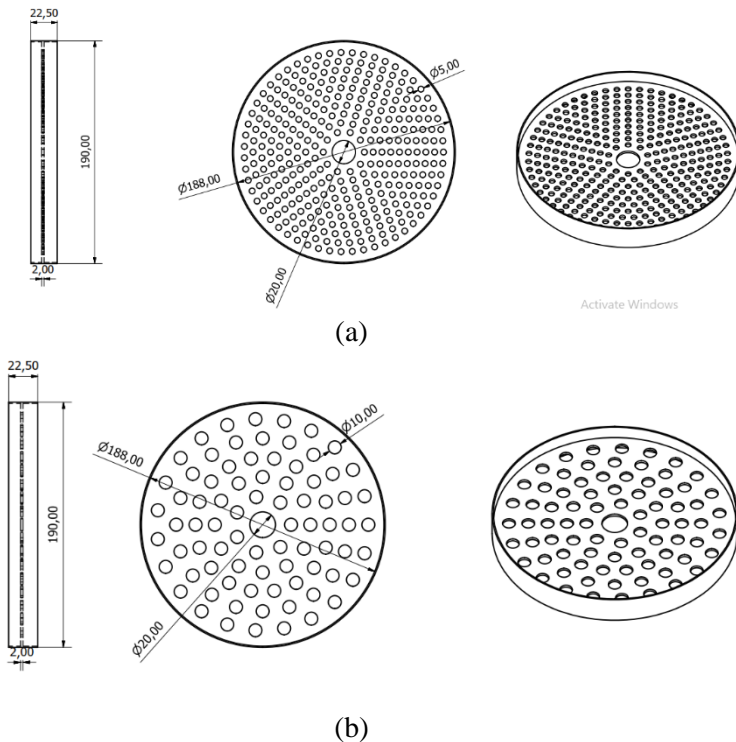
Gambar 3.2 Skema instalasi *peralatan fluidized bed coal dryer*

Keterangan:

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Dinding <i>drying chamber</i> | 8. <i>Pompa</i> |
| 2. <i>Perforated Plate</i> | 9. <i>Valve</i> |
| 3. <i>Body</i> bawah | 10. Saluran Air Radiator ke Drum |
| 4. Blower sentrifugal | 11. Saluran Air Drum ke Drum |
| 5. Pengarah udara | 12. <i>Heater</i> |
| 6. <i>Radiator (Heat exchanger)</i> | 13. Tangki Air |
| 7. Kipas <i>Radiator</i> | |

Pengamatan yang dilakukan pada eksperimen ini hanya terbatas pada proses pengeringan batubara di dalam *drying chamber*. Untuk mengetahui laju pengeringan batubara maka akan dipasang *thermocouple* 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.

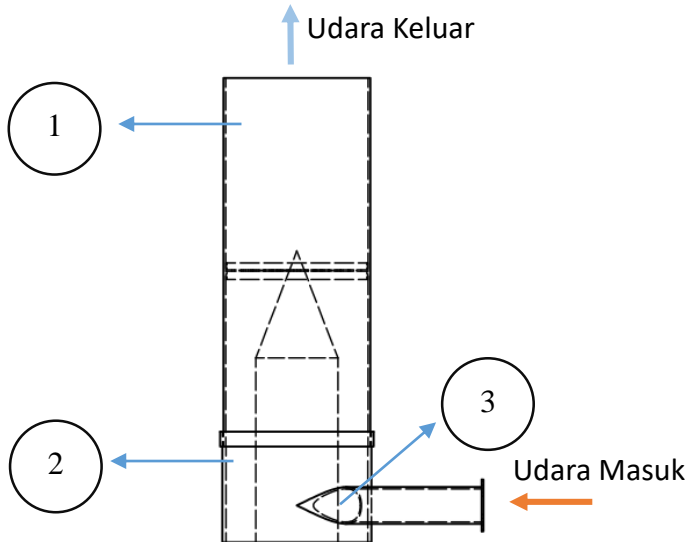
Udara pengering masuk melalui sisi bawah samping *chamber*, kemudian pada sisi tengah *drying chamber*, tepat sebelum udara mengenai batubara, terdapat *perforated plate* yang berfungsi sebagai pengarah aliran udara. Profil *perforated plate* pada *fluidized bed coal dryer* ini ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 3.3 (a) dimensi *perforated plate* diameter 5mm
 (b) dimensi *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*, *anemometer* dan *rh meter*

Keterangan:

1. Pada posisi 1 dipasang *themocouple* guna membaca temperatur beserta *rh meter* untuk membaca besarnya nilai *relative humidity* pada sisi masuk *drying chamber*.
2. Pada posisi 2 dipasang *themocouple* guna membaca temperatur beserta *rh meter* untuk membaca besarnya nilai *relative humidity* pada sisi keluar *drying chamber*.
3. Pada posisi 3 dipasang *anemometer* guna membaca kecepatan udara di selongsong.

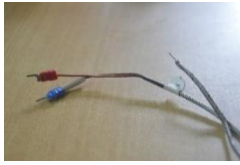
3.3 Variable Penelitian

Variable-variable yang digunakan untuk melakukan eksperimen ini ditentukan sebagai berikut:

- Variable bebas : Diameter *perforated plate* (5 mm & 10 mm, open area 6361,72 mm²), kecepatan fluidisasi *outlet chamber* (11,42 m/s, 12,22 m/s, 13,42 m/s)
- Variable tetap : beban pengeringan (300 gr), diameter batubara (7 mm), temperatur *inlet* udara pengering ($\pm 50^{\circ}\text{C}$), *massflow rate* udara pengering (0.081 kg/s),
- Penukar panas : *compact heat exchanger* dengan dua buah kipas
- Batubara : messing batubara dilakukan dengan menggunakan ayakan berukuran 10 mm dan 5 mm. batubara diasumsikan berbentuk granular.
- Dimensi chamber : diameter luar = 199.5 mm
Diameter dalam = 198 mm
Tinggi dinding chamber = 1.5 mm
- Suplai udara : udara pengering dialirkan menggunakan blower dengan daya 750 watt dan rotasi 2800 rpm. Kecepatan blower diatur menggunakan voltage regulator dari produk Matsunaga MFG.CO.LTD tipe Delux Slide Regulator.

3.4 Peralatan Penunjang

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



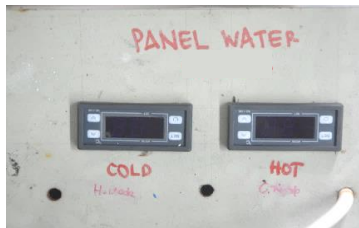
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Gambar 3.5 (a) *thermocouple*, (b) data akusisi, (c) rh meter, (d) *thermocontrol* (e) *toolkit*, (f) kompor dan gas LPG, (g) *heater*, (h) timbangan beban dan timbangan *digital*, (i) oven, (j) anemometer

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 2 *themocouple* yaitu pada sisi *inlet* dan *outlet heat exchanger*, saluran udara sesudah dan sebelum blower, *inlet* dan *outlet drying chamber*.

b. Data Akusisi

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 *terdisplay* 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*. Pada eksperimen ini menggunakan 2 buah Rh meter yang merupakan produk dari Elitech tipe RC-4HC. Pada alat ini, besarnya nilai *relative humidity* dapat langsung *terdisplay* pada layar, namun tersedia kabel USB untuk mempermudah penyimpanan data pada komputer.

d. *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. *Thermocontrol* yang digunakan merupakan *range* temperatur -55 s/d 120°C. Temperatur air dalam tangki dijaga 90°.

e. *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.

f. 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.

g. *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.

h. Timbangan Beban dan Timbangan *Digital*

Untuk mengukur massa batubara yang akan dimasukkan 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.

i. Oven

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

j. Anemometer

Anemometer berfungsi untuk mengukur kecepatan udara setelah melalui perforated plate

3.5 Metodologi Eksperimen

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

3.5.1 Studi Literatur

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

- 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. Menyiapkan dan memastikan peralatan eksperimen berada dalam kondisi baik.
2. Memecahkan batubara dengan menggunakan palu ingga berbentuk butir-butir. kemudian batubara disaring menggunakan ayakan berukuran 5 mm dan 10 mm untuk mendapatkan ukuran batubara dengan rata-rata 7 mm.
3. Menimbang batubara menggunakan timbangan beban dengan massa sebesar 300 gram untuk setiap variasi. Pada eksperimen ini akan dilakukan tiga variasi kecepatan fluidisasi 11 m/s, 12 m/s, 13 m/s dengan diameter 5 mm dan 10 mm 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 *terdisplay* pada layar komputer yang telah terinstal *software* MX100.

6. Rh meter dipasang pada sisi *inlet* dan *outlet drying chamber*. Kemudian pastikan rh meter terhubung dengan baik pada komputer.
7. Isi tangki air dengan aquades kemudian panaskan aquades menggunakan kompor dan *heater*.
8. Pompa air dinyalakan untuk mensirkulasikan air aquades yang telah dipanaskan menuju *heat exchanger*. Kemudian kipas dinyalakan untuk mensirkulasikan udara menuju *heat exchanger* sehingga terjadi perpindahan panas antara aquades dan udara.
9. Blower dinyalakan pada kecepatan tertentu. Kecepatan blower diatur berdasarkan hasil perhitungan kecepatan minimum fluidisasi yang diperoleh sebelumnya.

3.5.3 Tahap Pengambilan Data

1. Setelah alat siap digunakan, tunggu beberapa saat hingga temperatur udara pada *inlet drying chamber* bernilai 50°C.
2. Catat besarnya temperatur dan *relative humidity* pada sisi *inlet drying chamber* sebelum dilakukan pengerigan.
3. Ambil dan timbang butiran batubara sebanyak ± 11 gram sebagai sampel batubara ke-0.
4. Setelah temperatur udara menunjukkan angka 50°C, maka masukan butiran-butiran batubara sebanyak 300 gram.
5. Pengambilan sampel batubara dilakukan dengan interval waktu 1 menit selama 5 kali, lalu dilanjutkan pengambilan sampel batubara hingga menit ke-15 dengan interval 2 menit. 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 batubara, 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.
8. Timbang dan masukan masing-masing sampel batubara pada aluminium 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 ^[6].
9. Lakukan 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

Parameter Input		Parameter Output	
Konstan	Variasi	Diukur	Dihitung
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur inlet udara pengering ($\pm 50^{\circ}\text{C}$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diameter Perforated Plate <ul style="list-style-type: none"> ○ 5 mm ○ 10 mm • Kecepatan Fluidisasi <ul style="list-style-type: none"> ○ 11 m/s ○ 12 m/s ○ 13 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> • 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 	<ul style="list-style-type: none"> • Moisture content • Drying rate

3.5.5 Lembar Pengambilan Data

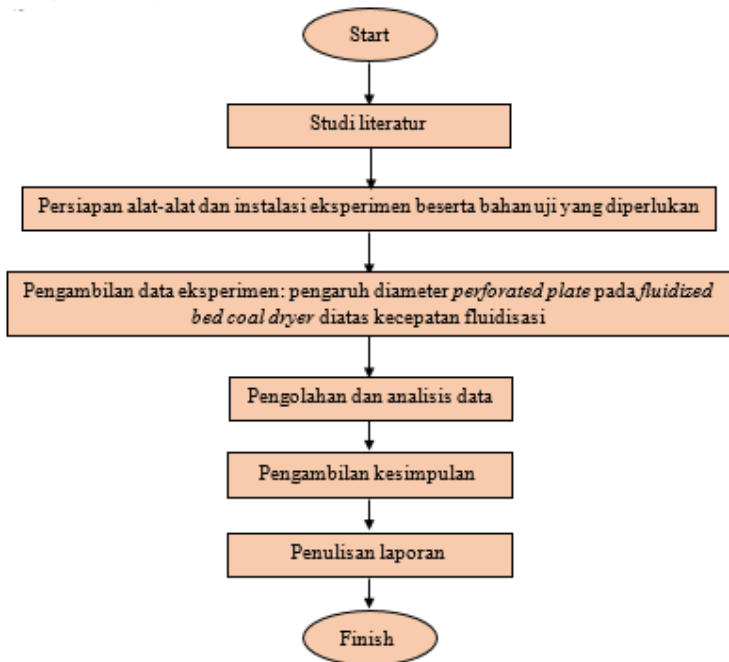
Lembar pengambilan data eksperimen ini ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 3.2 Lembar pengambilan data

no	waktu (menit ke-)	T1 (<i>inlet</i>)	T2 (<i>outlet</i>)	Rh <i>inlet</i> (%)	Rh <i>outlet</i> (%)	Massa bb basah (gr)	Massa bb 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

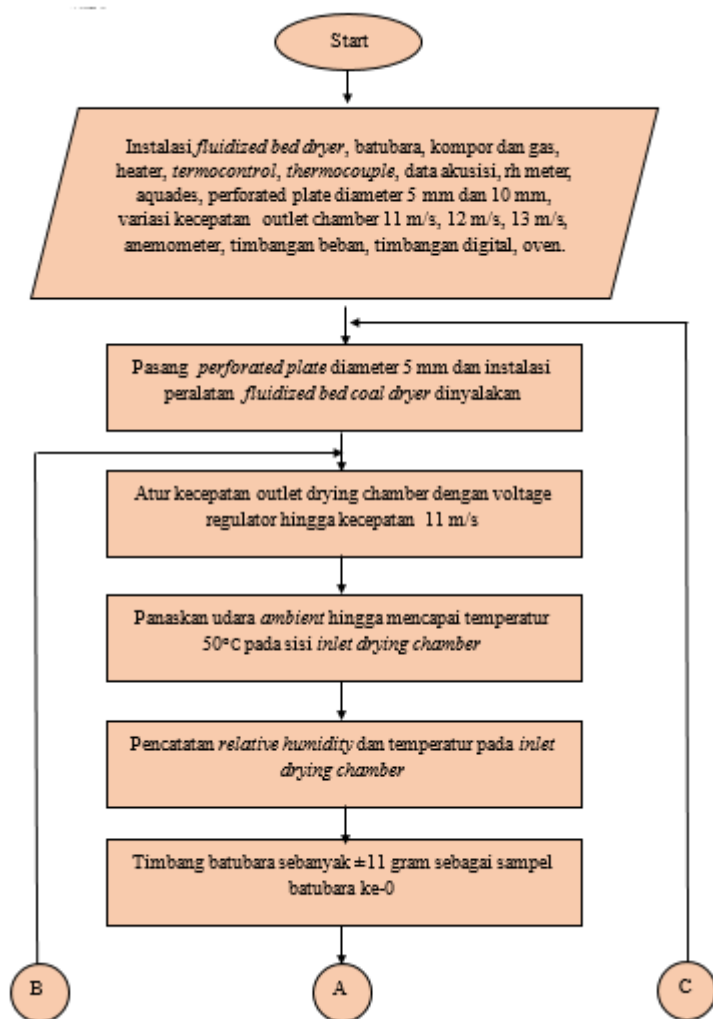
Tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan pada eksperimen ini ditunjukkan pada *flowchart* sebagai berikut:

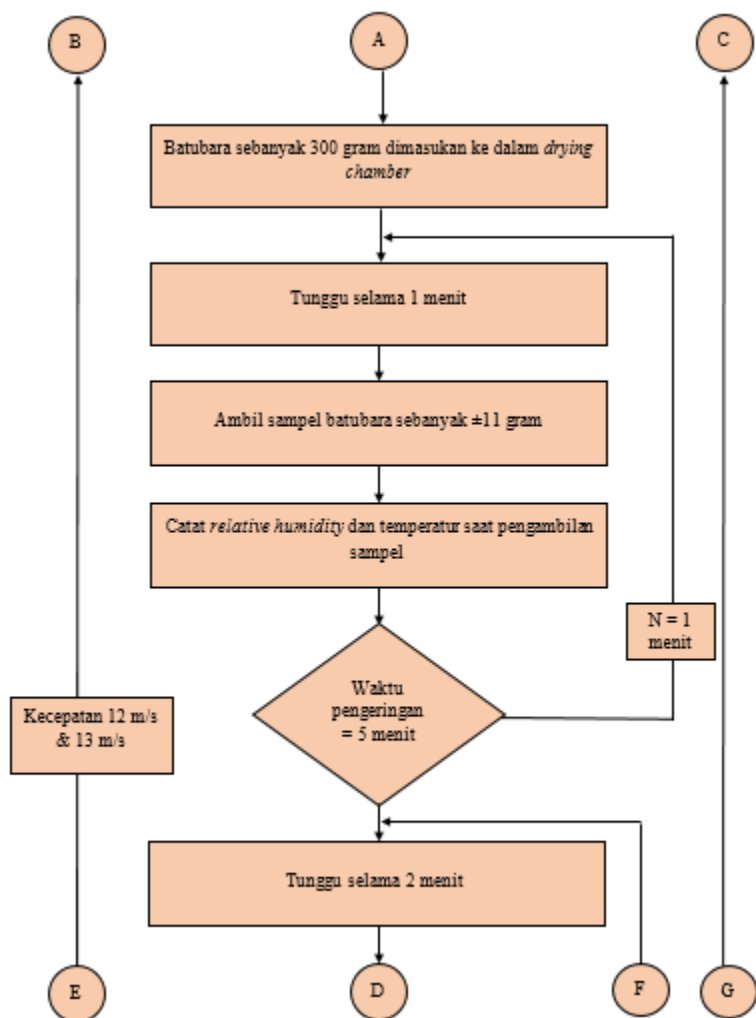


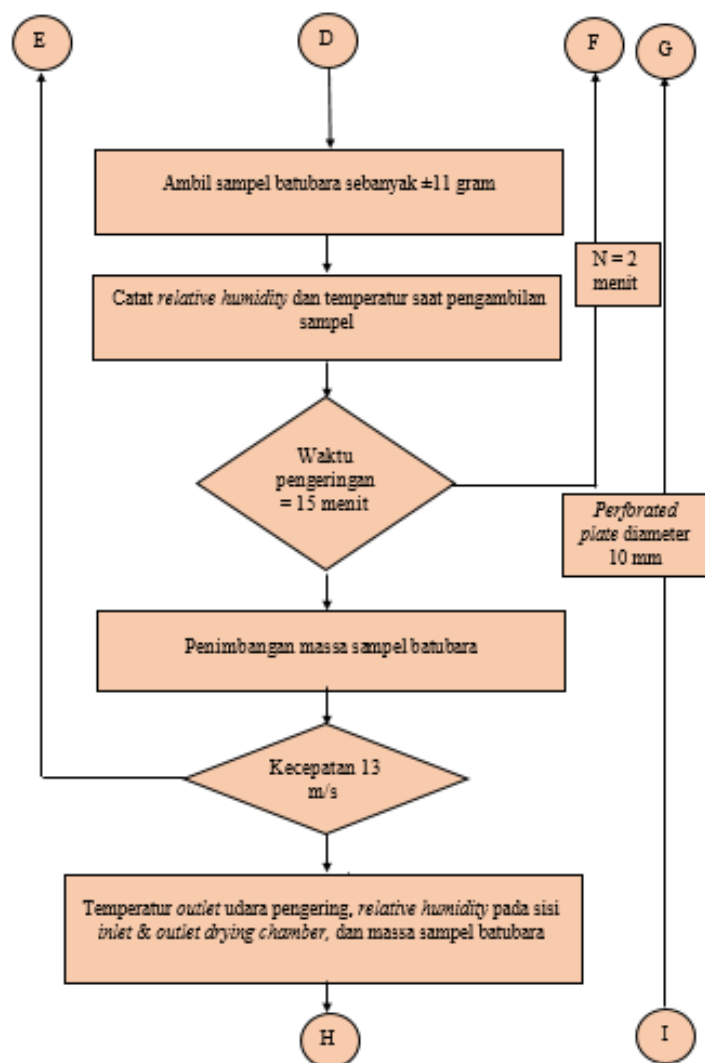
Gambar 3.6 *Flowchart* penelitian

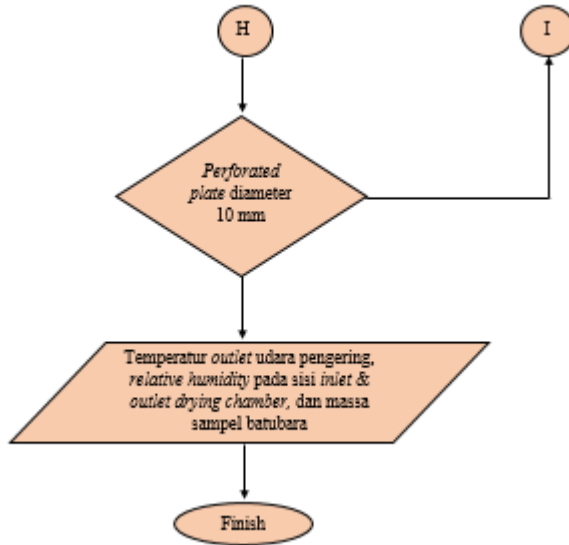
3.7 Flowchart Eksperimen

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









Gambar 3.7 Flowchart eksperimen

3.8 Jadwal Penelitian

Jadwal penelitian pada eksperimen ini ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 3.3 Jadwal penelitian

Kegiatan	Januari 2018				Februari 2018				Maret 2018				April 2018			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur																
Persiapan alat																
Penulisan proposal TA																
Pengujian alat (<i>trial</i>)																
Seminar proposal TA																
Pengambilan data																
Pengolahan data																

BAB 4

PEMBAHASAN

Pengeringan adalah proses perpindahan panas dan massa antara bahan (batubara) dengan media pengering (udara pengering). Perpindahan panas yang terjadi pada proses pengeringan ini adalah konveksi. Sedangkan perpindahan massa disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi massa uap air antara bahan dengan media pengering.

4.1 Data Hasil Percobaan

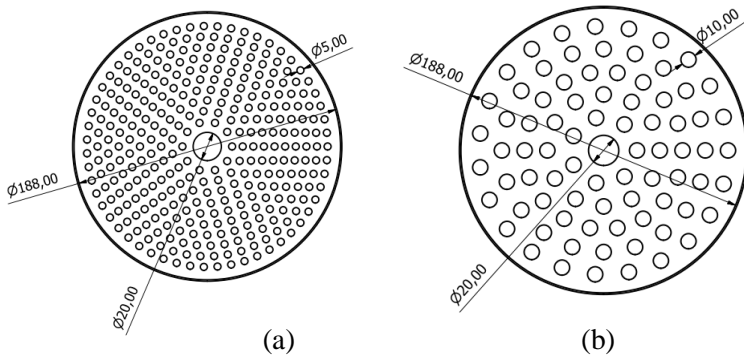
Data percobaan terdapat pada lampiran yang diperoleh dari hasil pengujian alat pengering batubara dengan *tipe fluidized bed dryer* dengan variasi kecepatan fluidisasi 11 m/s, 12 m/s, dan 13 m/s dan perforated plate diameter 5 mm dan 10 mm. Data hasil percobaan terlampir pada lampiran laporan tugas akhir ini.

4.2 Contoh Perhitungan

Dari semua data yang diperoleh selama uji eksperimen, digunakan contoh perhitungan dengan data yang diambil pada variasi kecepatan fluidisasi 13 m/s dengan diameter perforated plate 5 mm. Perhitungan data dilakukan dengan menggunakan persamaan yang sesuai dengan teori dan analogi.

4.2.1 Perhitungan Luasan Aliran Udara Pengering (V_p)

Luas penampang dihitung dari jumlah lubang pada *perforated plate* yang dilewati oleh udara pengering. Lubang pada pusat perforated plate dengan diameter 20 mm bukan termasuk *open area*. Berikut perhitungan luasan *open area* pada *perforated plate*



Gambar 4.1 (a) dimensi *perforated plate* diameter 5 mm
 (b) dimensi *perforated plate* diameter 10 mm

Cara menghitung *open area* pada plate adalah:

- *Perforated Plate* Diameter 5 mm

$A_p = [\text{luas 1 lubang perforated plate}] \times \text{total lubang pada perforated plate}$

$$A_p = \left[\frac{\pi}{4} d_{\text{perforated plate}}^2 \right] \times 324$$

$$A_p = \left[\left(\frac{\pi}{4} \times 5^2 \text{ mm}^2 \right) \times 324 \right]$$

$$A_p = 6361,72 \text{ mm}^2$$

- *Perforated Plate* Diameter 10 mm

$A_p = [\text{luas 1 lubang perforated plate}] \times \text{total lubang pada perforated plate}$

$$A_p = \left[\frac{\pi}{4} d_{\text{perforated plate}}^2 \right] \times 81$$

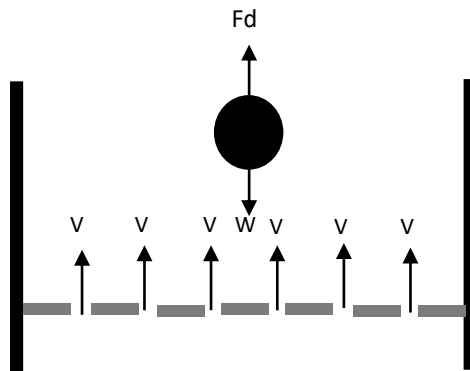
$$A_p = \left[\left(\frac{\pi}{4} \times 10^2 \text{ mm}^2 \right) \times 81 \right]$$

$$A_p = 6361,72 \text{ mm}^2$$

Dari perhitungan dapat dibuktikan bahwa *open area* kedua variasi *perforated plate* yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sama yaitu sebesar 6361,72 mm²

4.2.2 Kecepatan Minimum Fluidisasi (V_{\min})

Kecepatan minimum fluidisasi merupakan kecepatan minimum dari udara pengering yang dibutuhkan untuk mengangkat 1 partikel batubara pada lubang *perforated plate*. Kecepatan ini dihitung dengan menerapkan kesetimbangan gaya-gaya pada suatu partikel batubara. *Free body diagram* pada setiap partikel batubara pada saat proses pengeringan berlangsung ditunjukkan pada gambar 4.2



Gambar 4.2 Free-body diagram

$$\sum F_y = 0 \quad (2.2)$$

$$Fd - W = 0 \quad (2.3)$$

$$Fd = W \quad (2.4)$$

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

$$V = \sqrt{\frac{2 \rho_{batubara} \forall g}{Cd \rho_{udara} A}} \quad (2.6)$$

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

dengan :

$$Cd = 0,47$$

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi(3,5 \times 10^{-3})^2 m^2 = 1,539 \times 10^{-4} m^2$$

$$\forall = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (3,5 \times 10^{-3})^3 m^3 = 1,795 \times 10^{-7} m^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_{udara} (50^\circ\text{C}) = 1,084 \text{ kg/m}^3$$

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

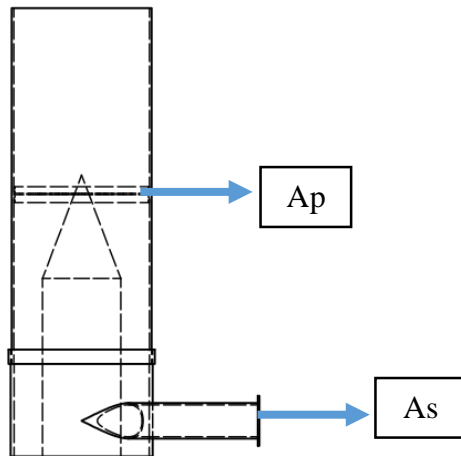
sehingga kecepatan minimum fludisasi ($V_{p \min}$) adalah :

$$V_{p \min} = \sqrt{\frac{2 \times 1450 \times 1,795 \times 10^{-7} \times 9,81}{0,47 \times 1,084 \times 1,539 \times 10^{-4}}}$$

$$V_{p \min} = 8,07 \text{ m/s}$$

- Luas Penampang pada Selongsong (A_s)

Luas Penampang pada selongsong tentunya berbeda dengan besar *open area* pada *perforated plate*. Untuk menentukan besarnya kecepatan udara pada selongsong, maka harus mengetahui terlebih dahulu luas penampang pada selongsong



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:

$$A_s = \frac{\pi}{4} d_i^2$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} 85^2 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 5674,5 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 5,6745 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

- Kecepatan pada Selongsong

Supaya kecepatan minimum fluidisasi dapat tercapai, maka kecepatan pada selongsong harus diketahui. Dengan menerapkan *mass balance* pada bidang A_p & A_s , mengasumsikan *steady-state* dan *incompressible flow*, maka kecepatan pada selongsong luasan A_s dapat dihitung

$$A_p \times V_{p \min} = A_s \times V_{s \min}$$

$$V_{s \min} = \frac{6,36172 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times 8,07 \text{ m/s}}{5,6745 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$V_s = 9,047 \text{ m/s}$$

Jadi kecepatan minimum untuk fluidisasi pada selongsong adalah sebesar 9,047 m/s

4.2.4 Perhitungan Mass Flow Rate Udara Pengering

Laju alir massa udara pengering bernilai berbeda pada ketiga variasi kecepatan. Sebagai contoh perhitungan, laju alir massa udara pada kecepatan 13 m/s dihitung pada persamaan berikut:

$$\dot{m}_{13 \text{ m/s}} = \rho \times V \times A$$

Dengan:

$$\rho \text{ udara (51,5}^\circ\text{C)} = 1,0783 \text{ kg/m}^3$$

$$V \text{ (kecepatan udara pengering)} = 13 \text{ m/s}$$

$$A \text{ (luasan selongsong)} = 5,6745 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{13\text{ m/s}} &= 1,0783 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 13 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 5,6745 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\ &= 0,07954 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\end{aligned}$$

4.2.5 Perhitungan Proses Pengeringan Pada Sisi Udara

Air (H₂O) berpindah dari batubara menuju udara dalam wujud uap air. Berdasarkan sudut pandang udara, *ratio humidity* digunakan untuk menghitung massa uap air yang diterima oleh udara selama proses pengeringan berlangsung yang nantinya akan dibandingkan dengan massa uap air yang dilepas oleh batubara. Contoh perhitungan akan mengacu pada data hasil percobaan yang terlampir pada laporan ini. Dengan menggunakan data udara pada variasi kecepatan 13 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm pada posisi inlet dan outlet menit ke-1, maka :

Data terukur udara inlet:

- *Relative humidity (RH)* : 16,7 %
- *Dry bulb temperature (T_{db1})* : 51,5 °C

Data terukur udara outlet menit ke-1:

- *Relative humidity (RH)* : 33,6 %
- *Dry bulb temperature (T_{db0})* : 42,8 °C

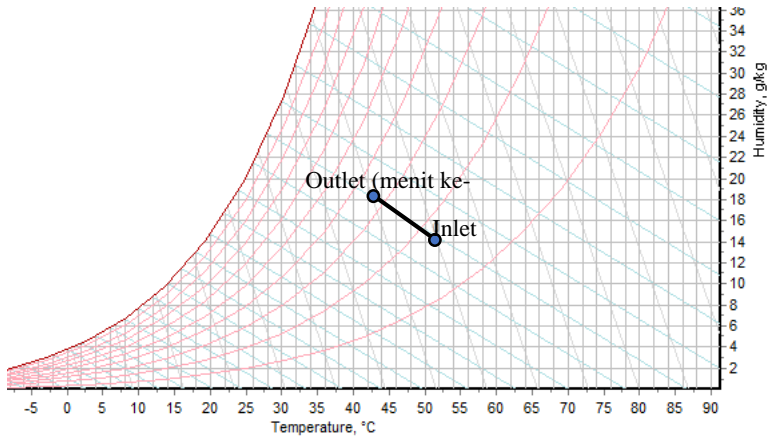
Data psikometrik udara inlet:

- *Wet bulb temperature (T_{wb0})* : 27,8°C
- *Enthalpy (h₀)* : 87,6 kJ/kg
- *Humidity ratio (ω₀)* : 14,02 gr H₂O/kg dry air

Data psikometrik udara outlet menit ke-1:

- *Wet bulb temperature (T_{wb1})* : 28,2°C
- *Enthalpy (h₁)*: 90,1 kJ/kg
- *Humidity ratio (ω₁)* : 18,24 gr H₂O/kg dry air

Pada *psychrometric chart* :



Gambar 4.4 Kondisi udara inlet dan outlet menit ke-1 pada kecepatan fluidisasi 13 m/s dan diameter perforated plate 5 mm

Pada sisi udara, jumlah massa air yang berpindah selama 1 menit pertama dapat dihitung dengan mengurangi *humidity ratio* menit ke-1 pada sisi *outlet* dengan *humidity ratio* pada posisi *inlet*, kemudian mengalikannya dengan massa udara kering yang mengalir selama 1 menit.

$$\Delta\omega_1 = \omega_{outlet} - \omega_{inlet} = (18,24 - 14,02) \text{ grH}_2\text{O/kg dry air} \\ = 4,22 \text{ gr H}_2\text{O/kgdry air}$$

$$m_{dry\ air} = \frac{(\dot{m}_{13} \frac{m}{s} \times t)}{\left(\left(\omega_{inlet} \times \frac{1\ kg}{1000\ gr} \right) + 1 \right)} =$$

dengan:

$m_{dry\ air}$ = massa udara kering yang mengalir selama 1 menit (kg dry air)

t = interva waktu pengeringan 1 menit (sec)

$$m_{dry\ air} = \frac{0.07954\ kg/s \times 60\ s}{\left(\left(14,02\ grH_2O/kg\ dry\ air \times \frac{1\ kgH_2O}{1000\ H_2O} \right) + 1 \right)}$$

$$= 4,7063\ kg\ dry\ air$$

Jumlah massa uap air yang berpindah selama satu menit pertama adalah:

$$m_{w_{0-1}} = \Delta\omega_1 \times m_{dry\ air}$$

$$= 4,22\ gr\ H_2O/kg\ dry\ air \times 4,7063\ kg$$

$$= 19,8605\ gr$$

4.2.6 Perhitungan Proses Pengeringan Pada Sisi Batubara

Perhitungan pada sisi batubara dilakukan dengan mengukur berat sampel batubara yang diambil selama proses pengeringan berlangsung. Sebagai contoh perhitungan menggunakan data udara pada variasi kecepatan 13 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm pada menit ke-0 dan menit ke-1, maka :

Data batubara menit ke-0:

- Berat batubara basah (W_{bb0}) = 11,044 gram
- Berat batubara kering (W_{bk0}) = 8,056 gram

Data batubara menit ke-1:

- Berat batubara basah (W_{bb1}) = 10,820gram
- Berat batubara kering (W_{bk1}) = 8,41 gram

Perhitungan *moisture content (wet basis)* pada sampel batubara menit ke-0 dan ke-1 adalah:

$$\%MC_0 = \frac{W_{bb0} - W_{bk0}}{W_{bb0}} = \frac{11,044 - 8,152}{11,044} = 33,911 \%$$

$$\%MC_1 = \frac{W_{bb1} - W_{bk1}}{W_{bb1}} = \frac{10,820 - 8,41}{10,820} = 26,819 \%$$

Jumlah massa uap air yang berpindah selama menit pertama adalah:

$$m_{w_{0-1}} = (\%MC_0 \times 300 \text{ gram}) - (\%MC_1 \times 300 \text{ gram})$$

$$(33,911 \% \times 300 \text{ gram}) - (26,819 \% \times 300 \text{ gram}) = 21,276 \text{ gram}$$

Drying rate pada sisi batubara adalah:

$$\text{Drying Rate} = \frac{m_{w_{0-1}}}{t} = \frac{21,27 \text{ gram}}{1 \text{ min}} = 21,276 \text{ gram}/\text{min}$$

4.2.7 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas

Proses perpindahan panas adalah proses perpindahan panas dari udara pengering ke dalam batubara yang terjadi secara konveksi sedangkan perpindahan massa adalah proses perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering. Pada masing-masing proses tersebut terdapat koefisien perpindahan panas & massa. Saat proses pengeringan berlangsung perpindahan panas dan massa berlangsung secara hampir bersamaan. Untuk menghitung koefisien perpindahan panas dan massa digunakan data pada variasi kecepatan 13 m/s dengan *perforated plate* diameter 5 mm yang terlampir pada lamiran tabel A. laporan tugas akhir ini.

a. Menghitung Reynolds Number (Re_D)

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

$$Re_D = \frac{1,0803 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 11,594 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,007 \text{ m}}{194,164 \times 10^{-7} \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}} = 4507,152$$

b. Menghitung Nusselt Number (Nu_D)

$$\begin{aligned} Nu_D &= 2 + 0,6 Re_D^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \\ &= 2 + 0,6 (4507,152^{1/2}) \times 0,703^{1/3} \\ Nu_D &= 37,869 \end{aligned}$$

c. Nilai koefisien perpindahan panas (h)

$$\begin{aligned} h &= Nu_D \times \frac{k}{D} \\ h &= 37,869 \times \frac{28,06 \times 10^{-3}}{0,007} \\ h &= 151,804 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

4.2.8 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

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.. Pada penelitian ini terdapat nilai koefisien perpindahan massa secara teoritis dan aktual. Nilai koefisien perpindahan massa secara teoritis belum tentu sesuai dengan aktual yang telah dilakukan karena beberapa faktor. Sehingga perlu dilakukan validasi nilai dari hasil aktual terhadap perhitungan teoritis. Sebagai contoh berikut adalah perhitungan pada variasi kecepatan 5 m/s dengan diameter *perforated plate* 5 mm.

- **Koefisien Perpindahan Massa Teoritis (h_m)**

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

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

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

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

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

Dengan nilai

$$h = 151,804 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{fg}(T=324,5 \text{ K}) = h_g - h_f = (2593,7 - 214,99) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2378,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2378,71 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

Diasumsikan (pada menit ke-1) :

$$T_s = 313,2^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 324,5$$

$$\rho_{As} = 1,083 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{A\infty} = 1,0783 \text{ kg/m}^3$$

$$h_m = \frac{151,804 \text{ W/m}^2\text{K} (324,5 - 313,2)^\circ\text{C}}{2378,71 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{g}} (1,083 - 1,0783) \text{ kg/m}^3}$$

$$= 0,135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- **Koefisien Perpindahan Massa Actual (h'_m)**

- Menghitung Laju Perpindahan Massa (n_A)**

$$n_A = \text{drying rate}_{(\text{menit ke 1})}$$

$$= 21,276 \frac{\text{gr}}{\text{min}} \cdot \left[\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \right] \cdot \left[\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right]$$

$$= 3,546 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

- Menghitung Luas Permukaan Batubara (A_{sur})**

Berat total batubara = 300 gr

Berat 1 batubara = 0,103 gr

$$A_{sur} = \text{Berat total batubara} \times A_{sur(1\text{batubara})}$$

$$A_{sur} = \frac{300 \text{ gr}}{0,103 \text{ gr}} \times 4\pi (3,5 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$$

$$A_{sur} = 0,4483 \text{ m}^2$$

- Menghitung Koefisien Perpindahan Massa Actual (h'_m)**

$$\rho_{As} = 1,083 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{A\infty} = 1,0783 \text{ kg/m}^3$$

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

$$h'_m = \frac{3,546 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{0,4483 \text{ m}^2 (1,083 - 1,0783) \text{ kg/m}^3}$$

$$= 0,168 \text{ m/s}$$

d. Validasi Nilai Hasil Aktual dengan Teoritis

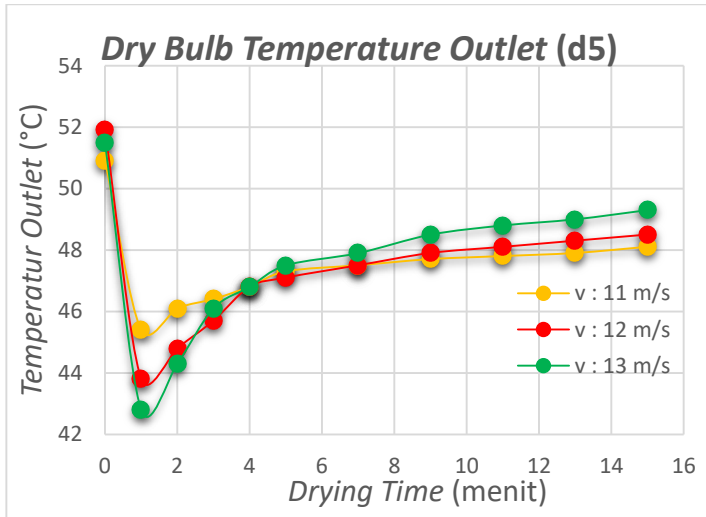
$$\frac{h_m - h'_m}{h'_m} \times 100\% = \frac{0,135 - 0,168}{0,168} \times 100\%$$

$$= 19,30\% \text{ (ERROR)}$$

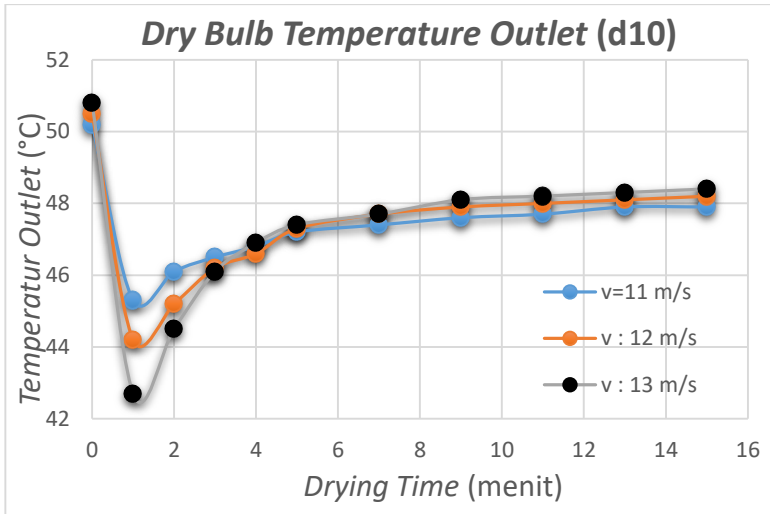
4.3 Analisis Hasil & Pembahasan Proses Pengeringan dari Sisi Udara Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm & 10 mm

4.3.1 Analisis Pada *Dry-bulb Temperature Outlet*

- Analisis *Dry-bulb Temperature Outlet* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm 10 mm



Gambar 4.5 Grafik *dry bulb temperatur outlet* vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.6 Grafik *dry bulb* temperatur outlet vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 10 mm

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan grafik *dry-bulb temperature outlet* terhadap *drying time*. Pada grafik diatas terjadi kenaikan *temperatur outlet chamber* pada meni ke-0. Kenaikan *temperatur outlet chamber* pada menit ke 0 bukan disebabkan oleh kenaikan kecepatan fluidisasi, akan tetapi disebabkan oleh naiknya temperatur air ditangki yang disirkulasikan ke *heat exchanger* . Seharusnya *temperatur outlet chamber* pada menit ke 0 konstan, dengan menjaga temperatur air untuk *heat exchanger* tetap konstan

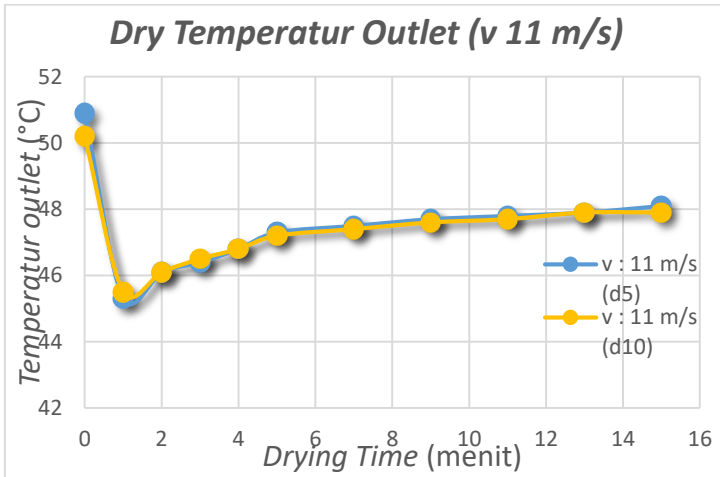
Penurunan *dry-bulb temperature outlet* antara *inlet* dan *outlet drying chamber* pada variasi *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm ditentukan oleh besarnya perpindahan panas yang terjadi antara udara pengering dengan batubara. Pada variasi *perforated plate* diameter 5 mm besarnya nilai *dry-bulb temperature outlet* dimenit pertama mengalami penurunan hingga mencapai 45,4 °C, 43,8 °C, dan 42,8 °C untuk masing-masing

kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s. Trendline grafik yang sama terjadi ada variasi *perforated plate* diameter 10 mm, dimana besarnya nilai *dry-bulb temperature outlet* dimenit pertama mengalami penurunan hingga mencapai 45,3 °C, 44,2 °C, dan 42,7 °C untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s. Sesuai dengan teori perpindahan panas, *Reynolds Number* yang tinggi pada *drying chamber* akan menghasilkan perpindahan panas yang tinggi pula. Dengan dimensi *drying chamber* dan temperatur *inlet* dari udara pengering yang tetap, maka satu satunya faktor yang mempengaruhi besarnya *Reynolds Number* adalah kecepatan fluidisasi yang divariasikan pada eksperimen ini.

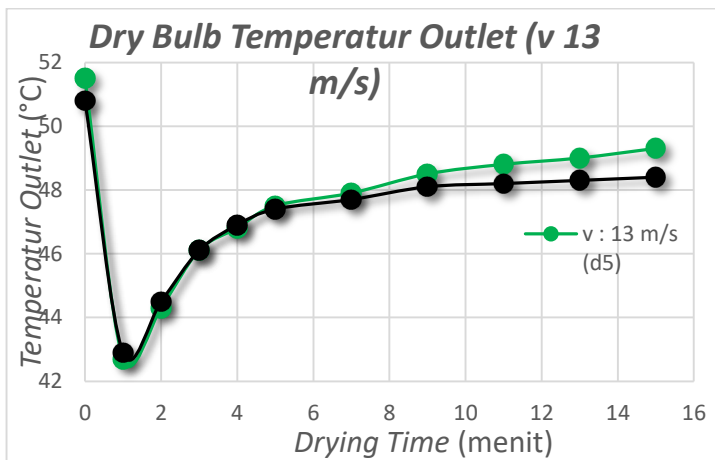
Memiliki *Reynolds Number* terbesar, variasi kecepatan 13 m/s mengalami *heat transfer* terbesar dibandingkan variasi lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 4.5 dan 4.6 yaitu dengan penurunan temperatur (ΔT) antara *inlet* dan *outlet drying chamber* pada variasi 13 m/s m/s. Dengan kombinasi ΔT dan bilangan *Reynolds* yang tinggi, maka dapat dipastikan *heat transfer* terbesar terjadi pada variasi 13 m/s.

Melalui grafik pada gambar 4.5 dan 4.6 dapat diketahui bahwa *dry bulb temperature outlet* udara turun secara drastis pada menit ke-1, kemudian naik secara perlahan pada menit-menit berikutnya. Hal dikarenakan pada awal proses pengeringan, temperatur permukaan batubara berada pada nilai terendahnya. Perbedaan temperatur antara udara pengering dan temperatur permukaan batubara itulah yang meyebabkan terjadinya perpindahan panas terbesar dimenit-menit awal proses pengeringan pada ketiga variasi kecepatan.

- Analisa *Dry-bulb Temperature Outlet* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm vs 10 mm



Gambar 4.7 Grafik *dry bulb temperatur outlet* vs *drying time* pada kecepatan udara 11 m/s



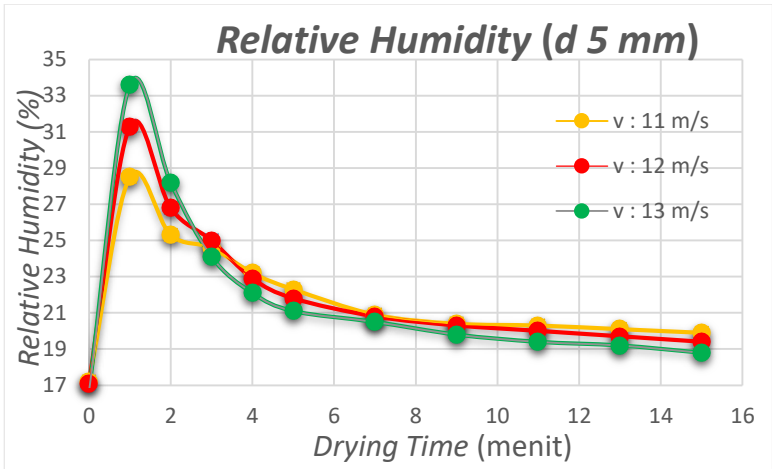
Gambar 4.8 Grafik *dry bulb temperatur outlet* vs *drying time* pada kecepatan udara 13 m/s

Gambar 4.7 dan 4.8 menunjukkan grafik *dry-bulb temperature outlet* terhadap *drying time*. Penurunan *dry-bulb temperature outlet* antara *inlet* dan *outlet drying chamber* pada variasi kecepatan 11 m/s dan 13m/s ditentukan oleh besarnya perpindahan panas yang terjadi antara udara pengering dengan batubara. Pada variasi kecepatan 11 m/s besarnya nilai *dry-bulb temperature outlet* dimenit pertama mengalami penurunan hingga mencapai 45,3°C dan 45,5°C masing-masing untuk *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm. Trendline grafik yang sama terjadi ada variasi kecepatan 13 m/s, dimana besarnya nilai *dry-bulb temperature outlet* dimenit pertama mengalami penurunan hingga mencapai 42,7°C dan 42,9 °C masing-masing untuk masing-masing untuk *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm.

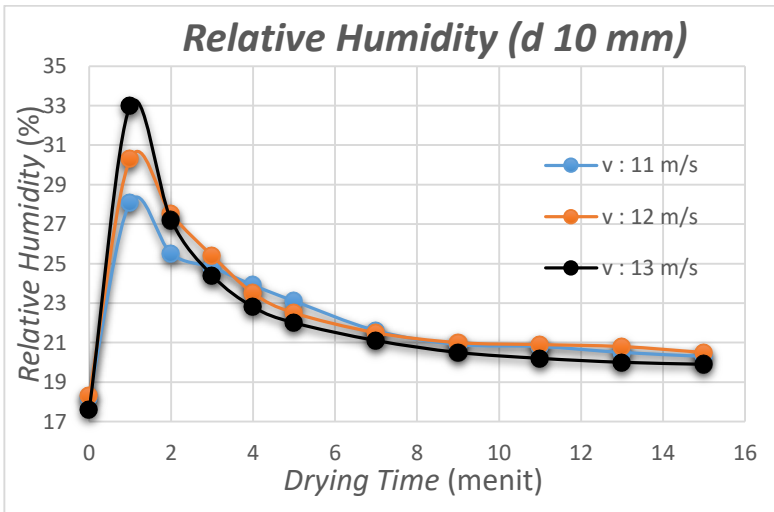
Pada Gambar 4.7 dan 4.8 menunjukkan bahwa nilai grafik *dry-bulb temperature outlet* dari *perforated plate* diameter 5 mm pada menit ke-1 memiliki *temperature outlet* lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai *temperature outlet* pada *perforated plate* diameter 10 mm. Kemudian pada menit-menit selanjutnya terjadi kenaikan *dry-bulb temperature outlet*, dimana *temperature outlet* dari *perforated plate* diameter 5 mm memiliki *trendline* lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai *temperature outlet* pada *perforated plate* diameter 10 mm . Hal ini disebabkan karena pada *perforated plate* diameter 5 mm, udara pengering memiliki distribusi lubang yang lebih merata dan saling berdekatan sehingga mampu mengangkat air yang terkandung pada batu bara secara lebih banyak dan menyeluruh. Proses pengeringan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm lebih efisien jika dibandingkan dengan *perforated plate* diameter 10 mm pada kondisi kecepatan yang sama sebesar 11 m/s dan 13 m/s.

4.3.2 Analisis Pada *Relative Humidity*

- Analisis *Relative Humidity* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm dan 10 mm



Gambar 4.9 Grafik *relative humidity* vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 5 mm



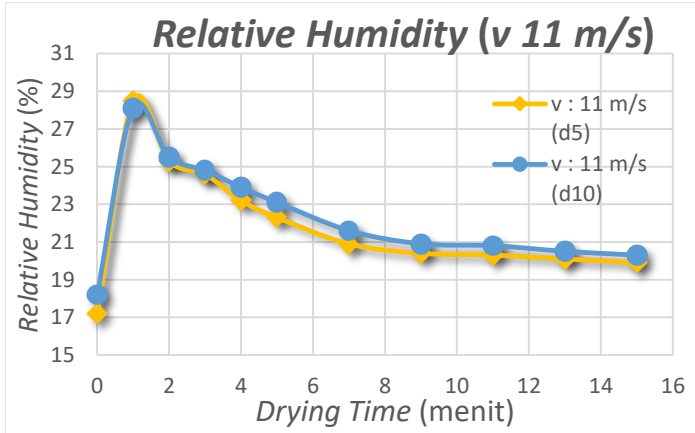
Gambar 4.10 Grafik *relative humidity* vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 10 mm

Gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan perubahan *relative humidity* udara *outlet* selama proses pengeringan berlangsung. Pada variasi *perforated plate* diameter 5 mm *relative humidity* di menit pertama mengalami kenaikan hingga mencapai 28,5%, 31,3%, dan 33,6% untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s, 13 m/s. Trendline grafik yang sama pada variasi *perforated plate* diameter 10 mm, dimana besarnya nilai *relative humidity* variasi diameter 10 mm pada menit pertama mengalami kenaikan hingga mencapai 28,1%, 30%, dan 33% untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s, 13 m/s.

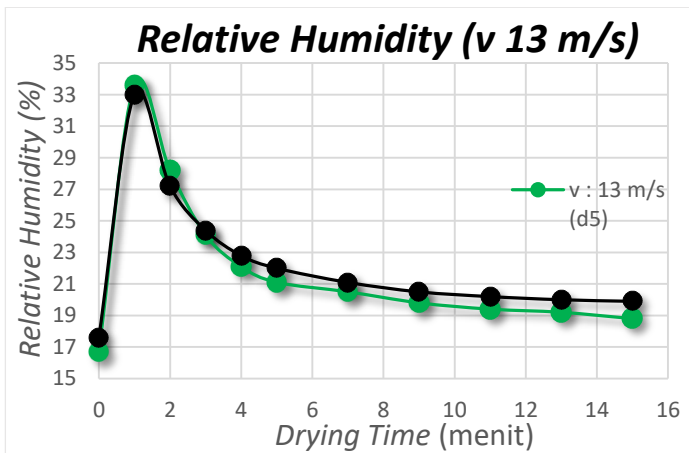
Pada menit ke-1 variasi 13 m/s memiliki nilai RH tertinggi, sedangkan pada menit ke-2 hingga menit ke-15 variasi 13 m/s mengalami penurunan RH yang lebih drastis dibandingkan variasi 11 m/s dan 12 m/s. Hal ini menandakan besarnya laju perpindahan massa air yang besar terjadi pada menit awal pengeringan.

Nilai *Relative Humidity* pada variasi 11 m/s dan 12 m/s cenderung memiliki penurunan nilai %RH yang tidak seberapa drastis. Hal ini disebabkan oleh kandungan air tersisa pada batubara yang masih cukup tinggi. Variasi kecepatan 13 m/s mampu membawa lebih banyak massa air ke udara sehingga dengan kata lain memiliki kinerja pengeringan yang lebih baik.

- Analisis *Relative Humidity* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm vs 10 mm



Gambar 4.11 Grafik *relative humidity* vs *drying time* pada kecepatan udara 11 m/s



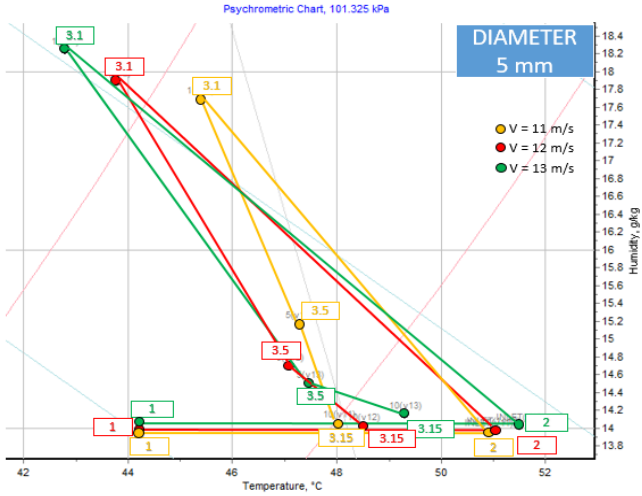
Gambar 4.12 Grafik *relative humidity* vs *drying time* pada kecepatan udara 13 m/s

Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan grafik *relative humidity* terhadap *drying time*. Kenaikan *relative humidity* dimenit pertama pada variasi kecepatan 11 m/s dan 13 m/s ditentukan oleh besarnya perpindahan panas yang terjadi antara udara pengering dengan batubara. Pada variasi kecepatan 11 m/s besarnya nilai *relative humidity* dimenit pertama mengalami kenaikan hingga mencapai 28,5 % dan 28,1 % masing-masing untuk *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm. Trendline grafik yang sama terjadi ada variasi kecepatan 13 m/s, dimana besarnya nilai *relative humidity* dimenit pertama mengalami kenaikan hingga mencapai 33,6 % dan 33 % masing-masing untuk masing-masing untuk *perforated plate* diameter 5 mm dan 10 mm.

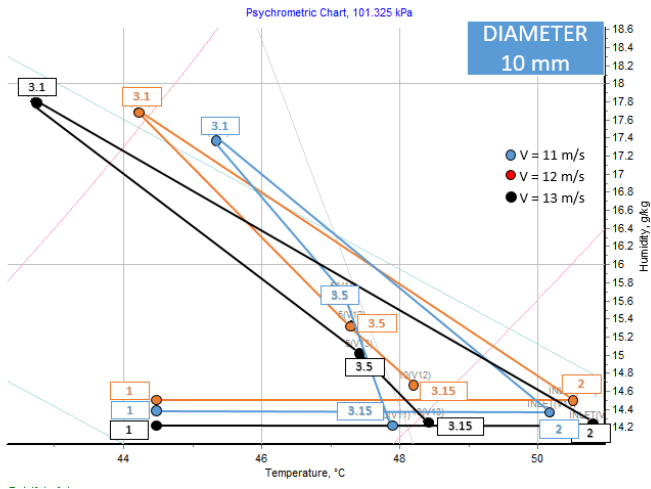
Pada Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan bahwa nilai grafik *relative humidity* dari *perforated plate* diameter 5 mm pada menit ke-1 memiliki *relative humidity* lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai *relative humidity* pada *perforated plate* diameter 10 mm. Kemudian pada menit-menit selanjutnya terjadi penurunan *relative humidity*, dimana *relative humidity* dari variasi *perforated plate* diameter 5 mm pada kecepatan 11 m/s ataupun 13 m/s memiliki *trendline* grafik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai *relative humidity* pada *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 besar luasan permukaan batubara yang mengalami kontak dengan udara pengering semakin banyak dan mampu mengangkat air pada batu bara lebih menyeluruh. Proses pengeringan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm lebih efisien jika dibandingkan dengan *perforated plate* diameter 10 mm pada kondisi kecepatan yang sama sebesar 11 m/s ataupun 13 m/s.

4.3.3 Analisis Pada *Psychrometric Chart*

- Analisis *Psychrometric Chart* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm dan 10 mm



Gambar 4.13 Kondisi udara pengering berdasarkan *psychrometric chart* pada diameter 5 mm



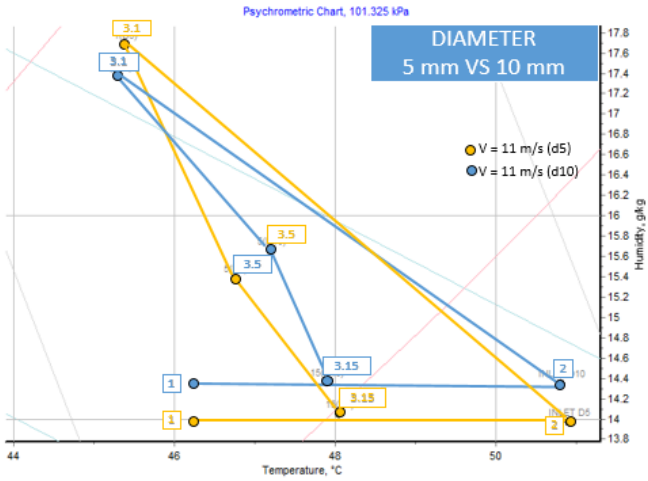
Gambar 4.14 Kondisi udara pengering berdasarkan *psychrometric chart* pada diameter 10 mm

Gambar 4.13 dan gambar 4.14 menunjukkan proses yang terjadi pada udara pengering selama proses pengeringan pada menit ke-1 hingga menit ke-15. Titik 1 merupakan kondisi udara ruangan saat eksperimen berlangsung. Titik 2 menandakan kondisi udara pengering pada *inlet drying chamber*. Titik 3.1-3.15 merupakan kondisi outlet udara pada *outlet drying chamber* saat menit ke-1 hingga ke-15 dengan masing-masing variasi kecepatan 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s.

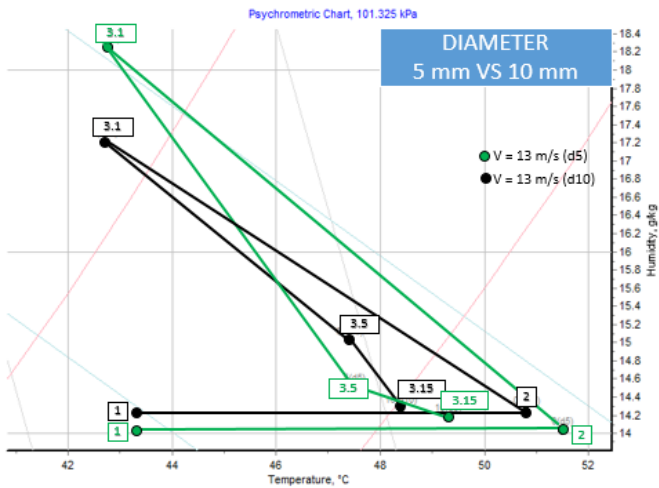
Kondisi awal udara pengering ditunjukkan pada titik 2. Setelah udara melewati batubara, kondisi udara bergeser ke titik 3.1 (untuk menit ke-1) yaitu ke arah kiri atas yang menandakan bahwa udara pengering mengalami proses *cooling and humidifying*. Kemudian kondisi udara dari titik 3.1 ke titik-titik berikutnya mengalami pergerakan ke arah kanan bawah mendekati titik 2. Pergerakan ke arah kanan bawah dari titik 3.1 menuju titik berikutnya merupakan proses *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 $\Delta\omega/\text{waktu}$ yang terjadi pada proses pengeringan menandakan bagus tidaknya suatu proses pengeringan. Apabila semakin besar nilai $\Delta\omega/\text{waktu}$ maka proses pengeringan juga semakin bagus. Berdasarkan gambar 4.13 dan 4.14 dapat diketahui bahwa pengeringan menggunakan kecepatan 13 m/s menghasilkan $\Delta\omega/\text{waktu}$ yang terbesar pada menit-menit awal daripada dengan variasi kecepatan 11 m/s dan 12 m/s, sehingga jika kita lihat pada penggunaan perforated plate 5 mm dan 10 mm, pengeringan dengan variasi 13 m/s merupakan pengeringan yang paling efisien.

- Analisis *Psychrometric Chart* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm dan 10 mm



Gambar 4.15 Kondisi udara pengering berdasarkan *psychrometric chart* pada kecepatan 11 m/s



Gambar 4.16 Kondisi udara pengering berdasarkan *psychrometric chart* pada kecepatan 13 m/s

Gambar 4.15 dan 4.16 menunjukkan proses yang terjadi pada udara pengering selama proses pengeringan. Titik 1 merupakan kondisi udara ruangan saat eksperimen berlangsung. Titik 2 menandakan kondisi udara pengering pada *inlet drying chamber*. Titik 3.1-3.15 merupakan kondisi outlet udara pada *outlet drying chamber* saat menit ke-1 hingga ke-15 dengan masing-masing variasi diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm pada kecepatan 11 m/s dan 13 m/s.

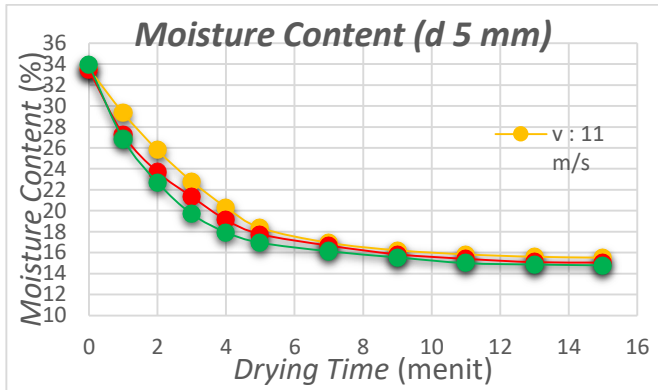
Kondisi awal udara pengering ditunjukkan pada titik 2. Setelah udara melewati batubara, kondisi udara bergeser ke titik 3.1 (untuk menit ke-1) yaitu ke arah kiri atas yang menandakan bahwa udara pengering mengalami proses *cooling and humidifying*. Kemudian kondisi udara dari titik 3.1 ke titik-titik berikutnya mengalami pergerakan ke arah kanan bawah mendekati titik 2. Pergerakan ke arah kanan bawah dari titik 3.1 menuju titik berikutnya merupakan proses *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 $\Delta\omega/\text{waktu}$ yang terjadi pada proses pengeringan menandakan bagus tidaknya suatu proses pengeringan. Apabila semakin besar nilai $\Delta\omega/\text{waktu}$ maka proses pengeringan juga semakin bagus. Berdasarkan gambar 4.15 dan 4.16 dapat diketahui bahwa pengeringan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm menghasilkan $\Delta\omega/\text{waktu}$ yang terbesar pada menit-menit awal daripada dengan *perforated plate* diameter 10 mm, sehingga jika kita lihat pada variasi kecepatan 11 m/s dan 13 m/s, pengeringan dengan menggunakan variasi *perforated plate* diameter 5 mm merupakan pengeringan yang paling efisien.

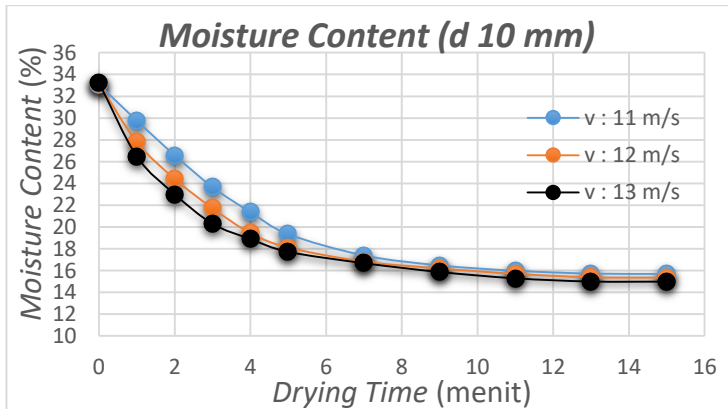
4.4 Analisis Hasil & Pembahasan Proses Pengeringan dari Sisi Batubara Pada Perforated Diameter 5 mm & 10 mm

4.4.1 Analisis Pada *Moisture Content* Batubara

- Analisis *Moisture Content* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm dan 10 mm



Gambar 4.17 Grafik *moisture content* vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 5 mm



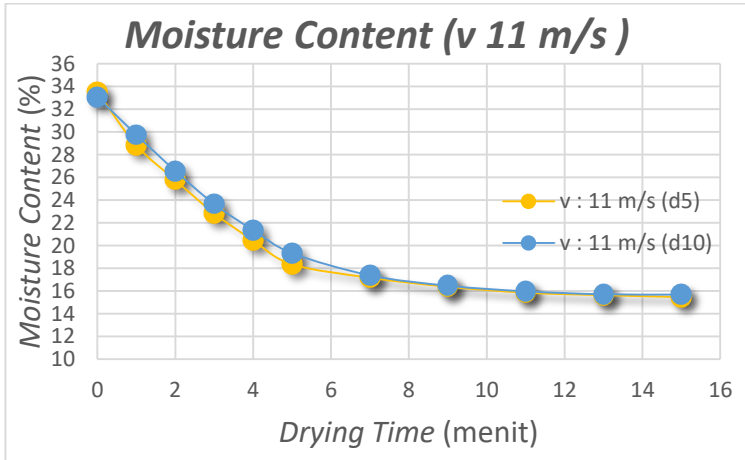
Gambar 4.18 Grafik *moisture content* vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 10 mm

Gambar 4.17 dan gambar 4.18 menunjukkan nilai *moisture content* pada batubara terhadap *drying time* pada ketiga variasi kecepatan. Pada variasi *perforated plate* diameter 5 mm besar nilai *moisture content* dimenit pertama mengalami penurunan hingga mencapai 28,84 %, 27,25 %, dan 26,81 % untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s. Trendline grafik yang sama terjadi pada variasi *perforated plate* diameter 10 mm, dimana nilai *moisture content* mengalami penurunan hingga mencapai 29,76 %, 27,80 %, dan 26,48 % untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s.

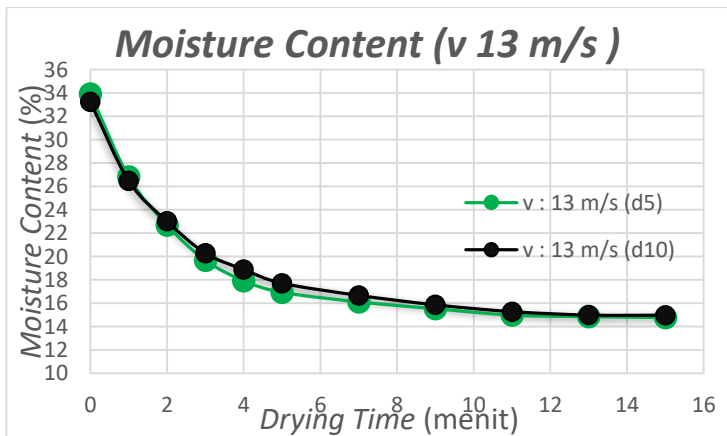
Moisture content mengalami penurunan disebabkan adanya uap air pada batubara yang terbawa secara terus-menerus oleh udara pengering. Pada menit ke 1-5 terjadi penurunan jumlah moisture content yang signifikan, hal ini disebabkan karena jumlah *moisture content* yang terdapat pada batubara untuk menit-menit awal masih banyak. Kemudian untuk menit ke 6-15 penurunan jumlah moisture content sudah tidak seberapa signifikan hal ini disebabkan karena jumlah *moisture content* yang terdapat pada batubara sudah semakin sedikit.

Secara garis besar, penurunan *moisture content* batubara terkecil terjadi pada kecepatan 11 m/s, sedangkan penurunan *moisture content* terbesar terjadi pada kecepatan 13m/s. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi kecepatan udara pengeringan maka nilai *Reynolds Number* pada *drying chamber* semakin tinggi, sehingga menghasilkan perpindahan massa dari batubara ke udara pengering yang tinggi pula.

- Analisis *Moisture Content* Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm vs 10 mm



Gambar 4.19 Grafik *moisture content* vs *drying time* pada kecepatan udara 11 m/s



Gambar 4.20 Grafik *moisture content* vs *drying time* pada kecepatan udara 13 m/s

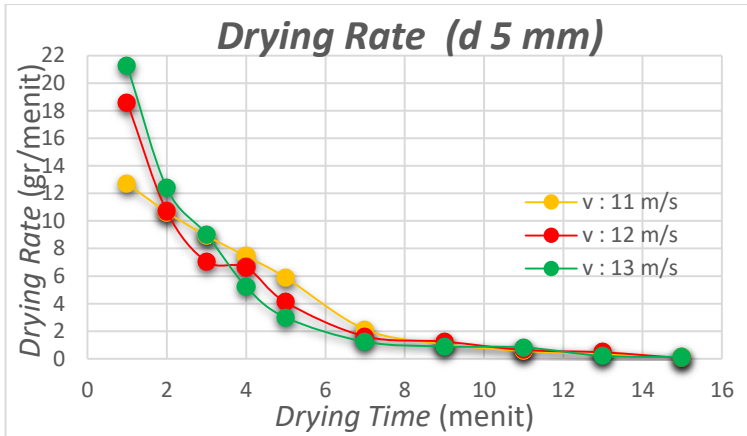
Gambar 4.19 dan gambar 4.20 menunjukkan nilai *moisture content* pada batubara terhadap *drying time* pada selama proses pengeringan berlangsung. Pada kecepatan 11 m/s nilai *moisture content* pada menit ke-5 mengalami penurunan hingga 18,35 %, dan 19,34 % untuk masing-masing *perforated plate* 5 mm dan 10 mm. Trendline grafik yang sama pada kecepatan 13 m/s, dimana besarnya nilai *moisture content* pada menit ke-5 mengalami penurunan hingga 16,94 %, dan 17,71 % untuk masing-masing *perforated plate* 5 mm dan 10 mm.

Pada Gambar 4.19 dan gambar 4.20 menunjukkan bahwa nilai grafik *moisture content* dari *perforated plate* diameter 5 mm pada menit ke-5 memiliki *moisture content* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai *moisture content* pada *perforated plate* diameter 10 mm. Kemudian untuk menit ke 6-15 penurunan jumlah *moisture content* sudah tidak seberapa signifikan hal ini disebabkan karena jumlah *moisture content* yang terdapat pada batubara sudah semakin sedikit.

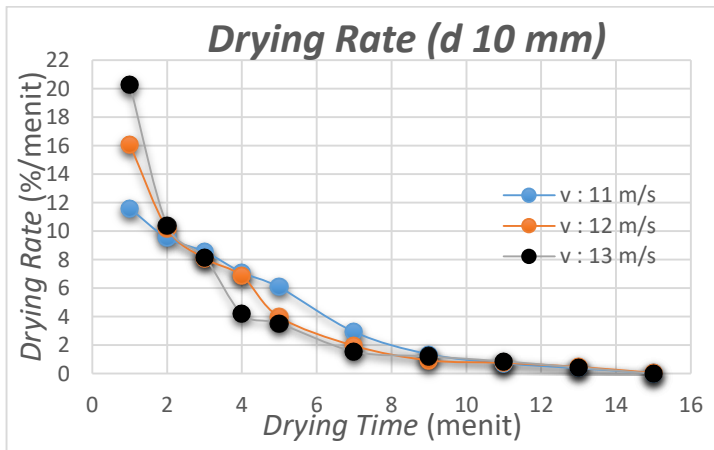
Moisture Content dari variasi *perforated plate* diameter 5 mm pada kecepatan 11 m/s ataupun 13 m/s memiliki *trendline* grafik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai *moisture content* pada *perforated plate* diameter 10 mm. Hal ini disebabkan karena pada *perforated plate* diameter 5 mm, memiliki distribusi lubang yang lebih merata dan saling berdekatan, sehingga besar luasan permukaan batubara yang mengalami kontak dengan udara pengering semakin banyak dan mampu mengangkat air pada batubara lebih menyeluruh. Proses pengeringan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm lebih efisien jika dibandingkan dengan *perforated plate* diameter 10 mm pada kondisi kecepatan yang sama yaitu sebesar 11 m/s ataupun 13 m/s.

4.4.2 Analisa Pada *Drying Rate Batubara*

- Analisis *Drying Rate* Batubara Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm dan 10 mm



Gambar 4.21 Grafik *drying rate* vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.22 Grafik *drying rate* vs *drying time* pada *perforated plate* diameter 10 mm

Gambar 4.21 dan gambar 4.22 menunjukkan grafik *drying rate* batubara terhadap *drying time* dari sampel batubara dengan tiga variasi kecepatan. Pada variasi *perforated plate* diameter 5 mm besarnya nilai *drying rate* dimenit pertama mengalami kenaikan yaitu 12,69 gr/menit, 18,59 gr/menit dan 21,27 gr/menit masing-masing untuk kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s. Trendline grafik yang sama terjadi pada variasi *perforated plate* diameter 10 mm, dimana nilai *drying rate* variasi diameter 10 mm pada menit pertama mengalami yaitu 11,59 gr/menit, 16,08 gr/menit 20,27 gr/menit masing-masing untuk kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s.

Rata-rata *drying rate* pada variasi *perforated plate* diameter 5 mm yaitu 4,98 gr/menit, 5,115 gr/menit dan 5,414 gr/menit masing-masing untuk kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s. Sementara. Rata-rata *drying rate* pada variasi *perforated plate* diameter 10 mm yaitu 4,83 gr/menit, 4,93 gr/menit dan 5,06 gr/menit masing-masing untuk kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s.

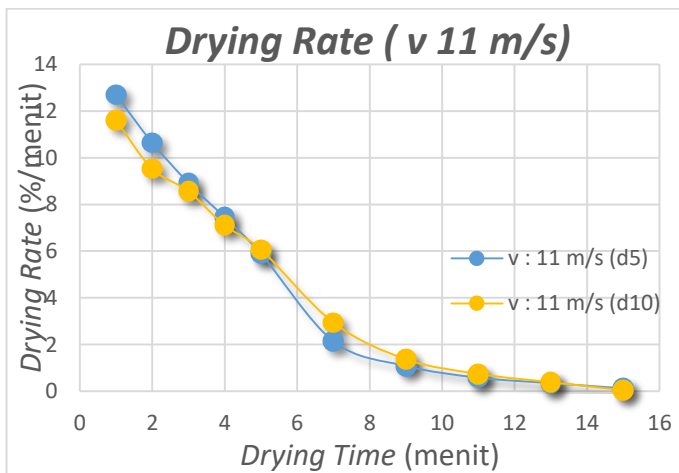
Penurunan nilai *drying rate* menunjukkan besarnya nilai *moisture content* yang hilang tiap satuan waktu. Besarnya penurunan ini dipengaruhi oleh kecepatan yang digunakan dalam proses pengeringan. Hal ini dikarenakan kecepatan berbanding lurus dengan *Reynolds Number*, dimana semakin tinggi kecepatan maka *Reynolds Number* $Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$. Nilai *Reynolds* ini akan mempengaruhi *Sherwood Number* $Sh = 2 + ((0.6Re_D^{1/2}) \cdot Sc^{1/3})$ dimana semakin besar *Reynolds Number* maka *Sherwood Number* akan semakin besar pula. Nilai *Sherwood Number* akan mempengaruhi koefisien perpindahan massa $h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L}$, dimana semakin besar *Sherwood Number* maka nilai koefisien perpindahan massa akan semakin besar. Nilai koefisien perpindahan massa mempengaruhi laju perpindahan massa $n_A = h_m \cdot A_S (\rho_{A,S} - \rho_{A,\infty})$, dimana semakin besar nilai koefisien

perpindahan massa maka laju perpindahan massa akan semakin besar.

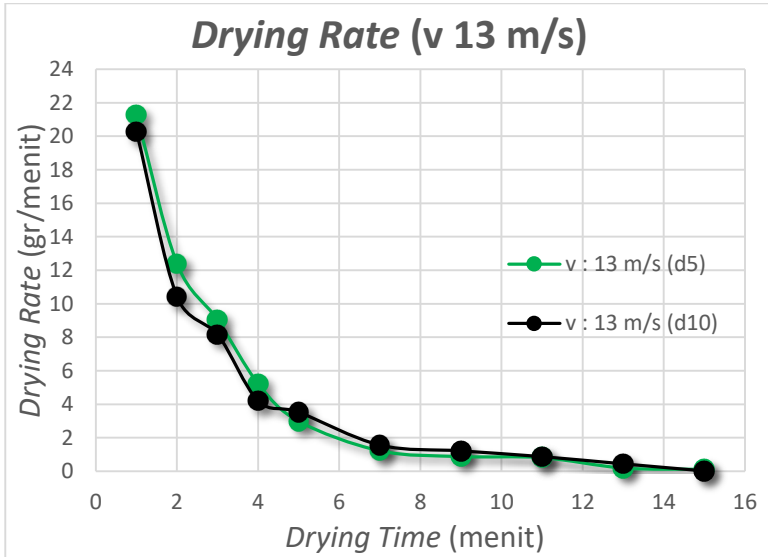
Nilai drying rate terbesar terjadi pada kecepatan 13 m/s. *Moisture content* akan cepat berkurang pada menit ke-1 sampai menit ke-5. Kemudian menunjukkan nilai yang konstant setelah menit ke-9. Untuk menghemat daya pengeringan, pada menit ke-9 hingga 15 kecepatan pengeringan diganti menjadi 12 m/s. Setelah itu kecepatan udara pengering diturunkan lagi menjadi 11 m/s.

Selanjutnya nilai yang konstan pada *drying rate* dikarenakan *moisture content* yang tersisa pada batubara hanya sedikit sehingga massa uap air yang berpindah ke udara juga akan semakin sedikit. S Dari grafik *drying rate* ini digunakan untuk mengetahui besarnya *moisture content* yang dilepas batubara ke udara tiap satuan waktu.

- Analisa *Drying Rate* Batubara Pada *Perforated Plate* Diameter 5 mm vs 10 mm



Gambar 4.23 Grafik *drying rate* vs *drying time* pada kecepatan udara 11 m/s

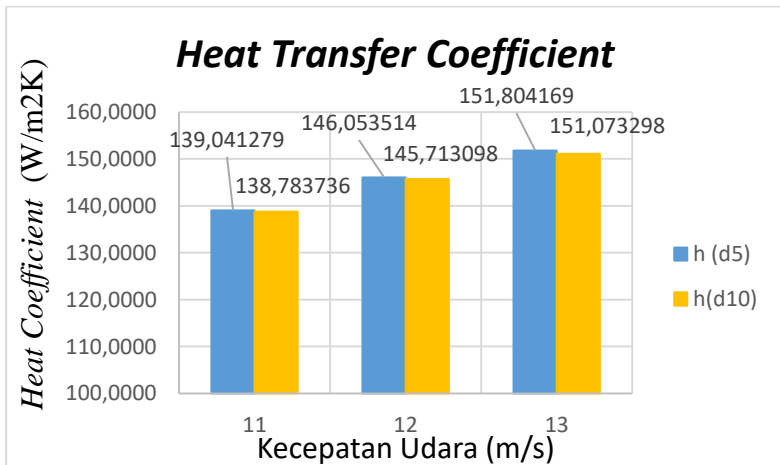


Gambar 4.24 Grafik *drying rate* vs *drying time* pada kecepatan udara 13 m/s

Gambar 4.23 dan 4.24 menunjukkan nilai *drying rate* pada batubara terhadap *drying time* selama proses pengeringan berlangsung. Pada kecepatan 11 m/s nilai *drying rate* menit ke-1 mengalami kenaikan hingga 12,69 gram/menit dan 11,59 gram/menit untuk masing-masing *perforated plate* 5 mm dan 10 mm. Trendline grafik yang sama terjadi pada kecepatan 13 m/s, dimana besarnya nilai *moisture content* pada menit ke-5 mengalami penurunan hingga 21,27 gram/menit, dan 20,27 gram/menit untuk masing-masing *perforated plate* 5 mm dan 10 mm.

Gambar 4.23 dan 4.24 menunjukkan bahwa nilai *drying rate* pada *perforated plate* diameter 5 mm dimenit ke-1 memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan nilai *drying rate* pada *perforated plate* diameter 10 mm. Kemudian pada menit-menit selanjutnya terjadi penurunan *drying rate* dimana *drying rate* dari variasi *perforated plate* diameter 5 mm pada kecepatan 11 m/s ataupun 13 m/s memiliki *trendline* grafik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai *drying rate* pada *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 besar luasan permukaan batubara yang mengalami kontak dengan udara pengering semakin banyak dan mampu mengangkat air pada batu bara lebih menyeluruh. Proses pengeringan menggunakan *perforated plate* diameter 5 mm lebih efisien jika dibandingkan dengan *perforated plate* diameter 10 mm pada kondisi kecepatan yang sama sebesar 11 m/s ataupun 13 m/s.

4.5 Analisis Hasil & Pembahasan Pengaruh Kecepatan Pengeringan Terhadap Koefisien Perpindahan Panas pada Perforated Diameter 5 mm & 10 mm



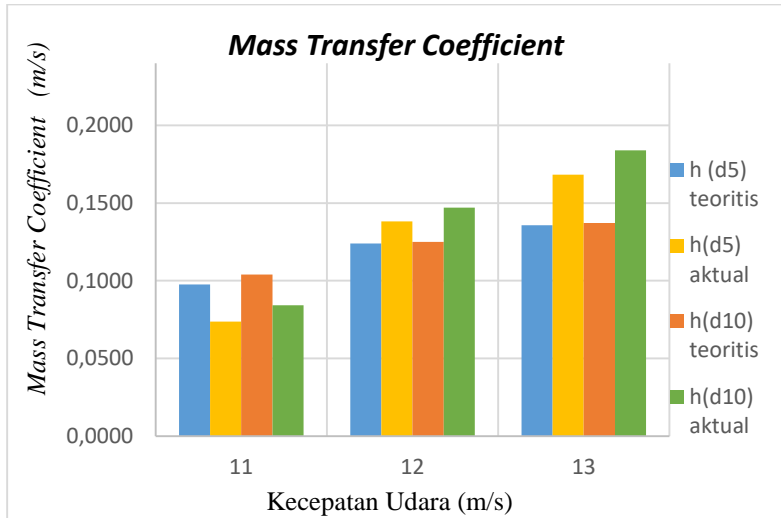
Gambar 4.25 Grafik *heat transfer coefficient* vs kecepatan udara

Gambar 4.25 merupakan grafik pengaruh kecepatan terhadap koefisien perpindahan panas yang mempunyai variasi kecepatan 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s. Besarnya *heat transfer coefficient* dengan variasi diameter 5 mm yaitu sebesar 139,041 W/m².K, 146,053 W/m².K, dan 151,804 W/m².K untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s. Sedangkan besar *heat transfer coefficient* variasi diameter 10 mm yaitu sebesar 138,783 W/m².K, 145,713 W/m².K, dan 151,073 W/m².K untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s.

Trendline grafik di atas menunjukkan bahwa dengan semakin bertambahnya kecepatan maka nilai koefisien perpindahan panas akan semakin besar pula. Hal ini dikarenakan kecepatan berbanding lurus dengan *Reynolds Number*, dimana semakin tinggi kecepatan maka *Reynolds Number* $Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$. Nilai *Reynolds* ini akan mempengaruhi *Nusselt Number* $Nu_D = 2 + ((0.6Re_D)^{1/2} \cdot Pr^{1/3})$, dimana semakin besar *Reynolds Number* maka *Nusselt Number* akan semakin besar pula. Nilai *Nusselt Number* akan mempengaruhi koefisien perpindahan panas $h = \frac{Nu_D k_f}{D}$, dimana semakin besar *Nusselt Number* maka nilai koefisien perpindahan panas akan semakin besar. Nilai koefisien perpindahan panas mempengaruhi laju perpindahan panas $Q = h \cdot A_S \cdot (T_\infty - T_S)$,

Dari gambar 4.25 dapat diketahui bahwa kecepatan 13 m/s memiliki nilai *heat transfer coefficient* paling besar. Hal 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 & Pembahasan Pengaruh Kecepatan Pengeringan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa pada Perforated Diameter 5 mm & 10 mm



Gambar 4.26 Grafik *mass transfer coefficient* vs kecepatan udara

Perpindahan massa merupakan proses perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering. Gambar 4.26 merupakan grafik pengaruh kecepatan terhadap koefisien perpindahan massa yang mempunyai variasi kecepatan 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s. Pada variasi diameter 5 mm, besarnya *mass transfer coefficient* ditinjau secara teoritis yaitu sebesar 0,0976 m/s, 0,1239 m/s, dan 0,1357 m/s untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s, sedangkan besar *mass transfer coefficient* ditinjau secara aktual yaitu sebesar 0,073 m/s, 0,138 m/s, dan 0,168 m/s untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s. Pada variasi

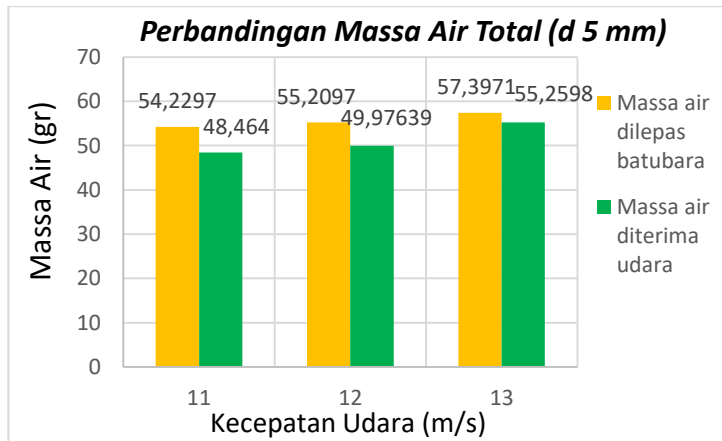
diameter 10 mm ,besarnya *mass transfer coefficient* ditinjau secara teoritis yaitu sebesar 0,104 m/s, 0,124 m/s, dan 0,137 m/s untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s, sedangkan besar *mass transfer coefficient* ditinjau secara aktual yaitu sebesar 0,084 m/s, 0,147 m/s, dan 0,183 m/s untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s 13 m/s.

Trendline grafik menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kecepatan udara maka nilai koefisien perpindahan massa akan semakin tinggi juga. Nilai koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi laju perpindahan massa $n_A = h_m \cdot A_s(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$. Koefisien perpindahan massa yang terjadi pada saat proses 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 actual 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.

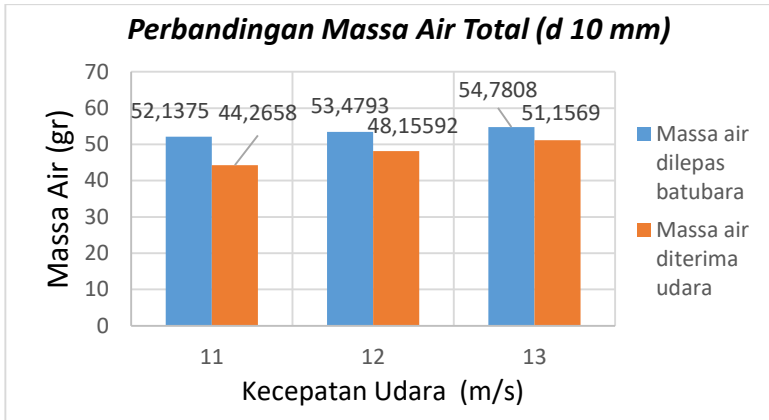
Berdasarkan gambar 4.26 dapat diketahui bahwa kecepatan 13 m/s memiliki nilai koefisien perpindahan massa paling besar, sedangkan pada gambar 4.25 dapat diketahui bahwa pada kecepatan 13 m/s memiliki nilai koefisien perpindahan panas terbesar juga. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar koefisien perpindahan panas maka nilai koefisien perpindahan massa juga akan semakin besar. Jika semakin besar nilai koefisien perpindahan massa maka laju

perpindahan massa akan semakin besar. Namun hasil eksperimen menunjukkan bahwa terdapat sedikit perbedaan antara h_m secara terotis dan h_m secara aktual. Error rata-rata yang terjadi pada diameter *perforated plate* 5 mm dan 10 mm berturut-turut adalah 20,7% dan 21,28 %. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu keakuratan alat ukur RH meter dan *thermocouple* , ketidakeragaman bentuk batubara, dan perubahan ukuran batubara yang terjadi selama proses pengeringan akibat tumbukan.

4.5 Analisis Hasil & Pembahasan Perbandingan Massa Air Total Terhadap Kecepatan Udara pada Perforated Diameter 5 mm & 10 mm



Gambar 4.27 Grafik perbandingan massa air total vs kecepatan udara pada *perforated plate* diameter 5 mm



Gambar 4.28 Grafik perbandingan massa air total vs kecepatan udara pada *perforated plate* diameter 10 mm

Gambar 4.27 dan gambar 4.28 menunjukkan grafik menunjukkan massa air (H_2O) yang berpindah pada selang waktu tertentu berdasarkan sudut pandang udara pengering dan juga dari sisi batubara dengan variasi kecepatan udara 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s. Pada variasi *perforated plate* diameter 5 mm besar massa air yang dilepas batubara mengalami kenaikan yaitu sebesar 54,2297 gram, 55,2097 gram dan 57,9371 gram untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s, sedangkan besar massa air yang diterima udara yaitu sebesar 48,464 gram, 49,976 gram dan 55,2598 gram. Trendline grafik yang sama terjadi pada variasi *perforated plate* diameter 10 mm. Pada variasi *perforated plate* diameter 10 mm besar massa air yang dilepas batubara mengalami kenaikan yaitu sebesar 52,1375 gram, 53,4793 gram dan 54,7808 gram untuk masing-masing kecepatan 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s, sedangkan besar massa air yang diterima udara yaitu sebesar 44,2568 gram, 48,1559 gram dan 51,1569 gram.

Trendline grafik menunjukkan bahwa dengan semakin bertambahnya kecepatan maka nilai koefisien perpindahan massa akan semakin besar. Hal ini dikarenakan kecepatan berbanding

lurus dengan *Reynolds Number*, dimana semakin tinggi kecepatan maka *Reynolds Number* $Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$. Nilai *Reynolds* ini akan mempengaruhi *Sherwood Number* $Sh = 2 + ((0.6Re_D)^{1/2}) \cdot Sc^{1/3}$ dimana semakin besar *Reynolds Number* maka *Sherwood Number* akan semakin besar pula. Nilai *Sherwood Number* akan mempengaruhi koefisien perpindahan massa $h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L}$, dimana semakin besar *Sherwood Number* maka nilai koefisien perpindahan massa akan semakin besar. Nilai koefisien perpindahan massa mempengaruhi laju perpindahan massa $n_A = h_m \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$.

Perbandingan jumlah uap air yang dilepas batubara dan diterima udara kecepatan 13 m/s lebih banyak jika dibandingkan kecepatan 11 m/s dan 12 m/s. Secara teori besarnya uap air yang dilepas batubara dan diserap udara adalah sama, namun terjadi ketidaksamaan antara uap air yang dilepas oleh batubara dan diterima oleh udara dapat disebabkan oleh beberapa hal. Bila dilihat dari sisi uap air yang dilepas oleh batubara, ketidaksamaan ini bisa disebabkan oleh ketidakseragaman *moisture content* awal yang dimiliki oleh tiap partikel batubara. Selain itu faktor bentuk juga memungkinkan perbedaan ini. Bentuk batubara yang tidak seragam juga mempengaruhi jumlah uap air yang dilepas oleh batubara. Bila dilihat dari sisi udara pengering, ketidaksamaan dapat diakibatkan kesalahan pembacaan alat ukur dan kebocoran pada *drying chamber*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan analisa yang telah dilakukan, didapatkan beberapa poin penting dari eksperimen ini yang dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kinerja pengeringan batubara terbaik dicapai menggunakan variasi kecepatan udara 13 m/s dengan *perforated plate* diameter 5 mm, dimana total massa air yang dapat dilepas batubara yaitu sebesar 57,3971 gram, sedangkan pada variasi kecepatan udara 13 m/s dengan *perforated plate* diameter 10 mm, total massa air yang dapat dilepas batubara yaitu sebesar 54,708 gram, Pengeringan menggunakan perforated plate diameter 5 mm lebih efisien daripada diameter 10 mm, dikarenakan 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.
2. Dari variasi kecepatan dan diameter *perforated plate* yang telah ditentukan, kecepatan 13 m/s dengan variasi *perforated plate* diameter 5 mm memiliki nilai penurunan *relative humidity* paling tinggi yaitu dari 33,6 % pada menit ke-1 menuju 18,8 % pada menit ke-15. Penurunan *relative humidity* disebabkan semakin banyak massa uap air yang berpindah ke udara dari batubara pada kecepatan 13 m/s jika dibandingkan dengan kecepatan 11 m/s dan 12 m/s.
3. Berdasarkan variasi kecepatan dan *diameter perforated plate* yang telah ditentukan, kecepatan 13 m/s dengan variasi *perforated plate* 5 mm memiliki selisih kenaikan temperatur paling tinggi, yaitu dari temperatur 42,7 °C pada menit ke-1 menuju temperatur 49,3 °C pada menit ke-31. Selisih temperature tertinggi ini dikarenakan pada

kecepatan 13 m/s moisture content pada batubara lebih cepat menguap sehingga temperatur outlet akan hampir sama dengan temperatur inlet.

4. Dari ketiga variasi kecepatan dan *diameter perforated plate 5 mm* yang telah ditentukan, kecepatan 13 m/s dengan variasi *perforated plate 5 mm* memiliki nilai *drying rate* sebesar 5,415 % per menit. *Moisture content* akan cepat berkurang pada menit ke-1 sampai menit ke-5 kemudian menunjukkan nilai yang konstant setelah menit ke-9, sehingga untuk menghemat daya pengeringan, pada menit ke-9 hingga 15 kecepatan pengeringan diganti menjadi 12 m/s kemudian diturunkan lagi menjadi 11 m/s.
5. Koefisien perpindahan panas paling besar terjadi pada kecepatan 13 m/s dan *diameter perforated plate 5 mm* dengan nilai 139,041 W/m².K. kecepatan 12 m/s memiliki koefisien perpindahan panas sebesar 146,053 W/m².K, sedangkan kecepatan 11 m/s memiliki koefisien perpindahan panas sebesar 151,804 W/m².K. Semakin tinggi nilai koefisien perpindahan panas maka semakin bagus proses pengeringan tersebut.
6. Koefisien perpindahan massa paling besar terjadi pada kecepatan 13 m/s dan *diameter perforated plate 5 mm* dengan nilai 0,168 m/s. Kecepatan 11 m/s memiliki nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,073 m/s. Kecepatan 12 m/s memiliki nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,138 m/s. Semakin tinggi nilai koefisien perpindahan massa maka semakin bagus proses pengeringan tersebut.
7. Pada *psychrometric chart* kondisi udara mengalami 3 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), lalu udara mengalami proses *heating and*

dehumidifying (bergerak ke arah kanan bawah) akibat terjadinya perpindahan panas dan massa antara udara

5.2 Saran

Berdasarkan eksperimen pengeringan dengan menggunakan alat *swirling fluidized bed coal dryer* yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa poin yang dapat penulis sarankan:

1. Perlu adanya pembaharuan alat ukur pada alat eksperimen guna meningkatkan keakuratan data hasil eksperimen.
2. Melakukan perawatan pada alat eksperimen agar performa dan kualitas data yang dihasilkan akurat.
3. Selama proses pengeringan berlangsung, batubara mengalami perubahan ukuran akibat tumbukan yang terjadi. Perubahan ukuran batubara ini dapat mempengaruhi proses perpindahan panas dan massanya.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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] J.G. Speight, 2005. **Handbook of Coal Analysis**. John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Ibrahim, Alim Jabbar. 2017. *Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Fluidisasi Terhadap Unjuk Kerja Swirling Fluidized Bed Coal Dryer Tanpa Pengaruh Aliran Berbentuk Cone*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia.
- [5] Sutar, Harekrushna dan Vikas Kumar,2012. *The Effect of Distributor Design on Hydrodynamics of Conical Fluidized Bed Dryer*. National Institute of Technology Rourkela, India.
- [6] ASTM D 5142 **Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures**
- [7] Engineering Toolbox. *Coal Heating Value*. www.engineeringtoolbox.com/coal-heating-values. Diakses Februari 2018

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

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

Perforated Plate Diameter 5 mm						
Menit	v = 11 m/s		v = 12 m/s		v = 13 m/s	
	Massa Basah	Massa Kering	Massa Basah	Massa Kering	Massa Basah	Massa Kering
	gr	gr	gr	gr	gr	gr
0	10,421	7,711	10,581	7,831	11,044	8,152
1	10,902	8,34	10,962	8,643	10,82	8,41
2	12,72	9,993	10,63	8,665	10,6	8,61
3	11,258	9,183	10,98	9,148	10,918	9,118
4	9,881	8,31	10,514	8,973	10,612	9,04
5	10,62	9,065	9,031	7,865	10,824	9,298
7	10,396	9	10,12	8,728	10,552	9,143
9	10,37	9,04	10,803	9,376	10,608	9,24
11	10,204	8,931	9,862	8,62	10,432	9,23
13	10,975	9,599	10,749	9,402	10,872	9,51
15	10,499	9,206	10,051	8,917	11,365	10,065

Tabel A.2 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 11 m/s (d5)

menit	Massa bb basah	massa bb kering	massa wadah	moisture content	drying rate	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(gr / menit)	(g)	(g)
0	10,33	7,644	2,343	33,62964818	0	100,8889	0,0000
1	10,986	8,36	2,163	29,76311912	11,59958717	89,2894	11,5996
2	10,668	8,4	2,138	26,58851114	9,52382395	79,7655	9,5238
3	9,458	7,725	2,156	23,73322377	8,565862089	71,1997	8,5659
4	10,38	8,621	2,148	21,36783285	7,096172781	64,1035	7,0962
5	10,588	8,955	2,147	19,34604905	6,065351403	58,0381	6,0654
7	10,108	8,724	2,149	17,38911924	2,935394715	52,1674	5,8708
9	9,702	8,46	2,164	16,47651897	1,368900398	49,4296	2,7378
11	10,266	8,97	2,158	15,98421312	0,738458772	47,9526	1,4769
13	9,207	8,097	2,149	15,7268348	0,386067488	47,1805	0,7721
15	10,416	9,12	2,161	15,69957601	0,040888174	47,0987	0,0818

Tabel A.3 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 12 m/s (d5)

menit	Massa bb basah	massa bb kering	massa wadah	moisture content	drying rate	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(gr / menit)	(g)	(g)
0	10,531	7,821	2,361	33,17013464	0	99,5104	0,0000
1	10,135	7,999	2,454	27,80887905	16,08376676	83,4266	16,0838
2	9,687	7,892	2,336	24,41844647	10,17129775	73,2553	10,1713
3	8,457	7,14	2,394	21,72191984	8,089579885	65,1658	8,0896
4	9,083	7,795	2,457	19,43857531	6,850033597	58,3157	6,8500
5	10,729	9,232	2,465	18,11471442	3,971582656	54,3441	3,9716
7	9,311	8,043	1,77	16,81474605	1,949952554	50,4442	3,8999
9	8,066	7,05	1,792	16,19381575	0,931395461	48,5814	1,8628
11	9,996	8,71	1,8	15,69058077	0,754852465	47,0717	1,5097
13	9,891	8,65	1,821	15,377943	0,468956659	46,1338	0,9379
15	9,66	8,564	2,517	15,34369313	0,051374809	46,0311	0,1027

Tabel A.4 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 13 m/s (d5)

menit	Massa bb basah	massa bb kering	massa wadah	moisture content	drying rate	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(% / menit)	(g)	(g)
0	11,211	8,321	2,516	33,23749281	0	99,7125	0,0000
1	9,787	7,681	1,834	26,48057337	20,27075833	79,4417	20,2708
2	11,391	9,191	1,83	23,01014538	10,41128396	69,0304	10,4113
3	11,388	9,437	1,771	20,28699179	8,169460791	60,8610	8,1695
4	10,378	8,767	1,848	18,8862837	4,202124242	56,6589	4,2021
5	11,555	9,83	1,816	17,71229079	3,521978745	53,1369	3,5220
7	10,678	9,2	1,813	16,67230682	1,559975948	50,0169	3,1200
9	10,899	9,456	1,802	15,86237221	1,214901921	47,5871	2,4298
11	11,248	9,898	2,414	15,28186552	0,870760037	45,8456	1,7415
13	9,852	8,631	1,706	14,98895163	0,43937083	44,9669	0,8787
15	11,576	10,227	2,569	14,97723992	0,017567562	44,9317	0,0351

Tabel A.5 Lembar data Temperatur dan *Relative Humidity* udara outlet (d5)

Perforated Plate Diameter 5 mm						
Menit	v = 11 m/s		v = 12 m/s		v = 13 m/s	
	Temperatur	RH	Temperatur	RH	Temperatur	RH
	°C	%	°C	%	°C	%
0	50,9	17,2	51	17,1	51,5	16,7
1	45,3	28,5	43,8	31,3	42,7	33,6
2	46,1	25,3	44,8	26,8	44,3	28,2
3	46,4	24,6	45,7	25	46,1	24,1
4	46,8	23,2	46,8	22,9	46,8	22,1
5	47,3	22,3	47,1	21,8	47,5	21,1
7	47,5	20,9	47,5	20,8	47,9	20,5
9	47,7	20,4	47,9	20,3	48,5	19,8
11	47,8	20,3	48,1	20	48,8	19,4
13	47,9	20,1	48,3	19,7	49	19,2
15	48,1	19,9	48,5	19,4	49,3	18,8

Tabel A.6 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 11 m/s (d 5 mm)

A	Q	V out Perforated Plate	waktu	T1	T2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ω inlet	massa udara kering	p udara	m udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m ³ /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	0,062414	9,810868759	0	50,9	50,9	17,2	17,2	27,7	87,4	13,96	13,960	3,9899	1,0803	0,06743	4,0456	0,0000	0,0000
0,00636172	0,062414	9,810868759	1	50,9	45,3	17,2	28,5	28,5	91,3	17,68	13,960	3,9899	1,0803	0,06743	4,0456	3,7200	14,8423
0,00636172	0,062414	9,810868759	2	50,9	46,1	17,2	25,3	27,9	88,3	16,22	13,960	3,9899	1,0803	0,06743	4,0456	2,2600	9,0171
0,00636172	0,062414	9,810868759	3	50,9	46,4	17,2	24,6	27,8	88,1	16,03	13,960	3,9899	1,0803	0,06743	4,0456	2,0700	8,2590
0,00636172	0,062414	9,810868759	4	50,9	46,8	17,2	23,2	27,6	86,8	15,38	13,960	3,9899	1,0803	0,06743	4,0456	1,4200	5,6656
0,00636172	0,062414	9,810868759	5	50,9	47,3	17,2	22,3	27,6	86,8	15,17	13,960	3,9899	1,0803	0,06743	4,0456	1,2100	4,8277
0,00636172	0,062414	9,810868759	7	50,9	47,5	17,2	20,9	27,2	85,1	14,39	13,960	7,9797	1,0803	0,06743	8,0911	0,4300	3,4313
0,00636172	0,062414	9,810868759	9	50,9	47,7	17,2	20,4	27,1	84,7	14,17	13,960	7,9797	1,0803	0,06743	8,0911	0,2100	1,6757
0,00636172	0,062414	9,810868759	11	50,9	47,8	17,2	20,3	27,1	84,6	14,13	13,960	7,9797	1,0803	0,06743	8,0911	0,1700	1,3565
0,00636172	0,062414	9,810868759	13	50,9	47,9	17,2	20,1	27,1	84,7	14,09	13,960	7,9797	1,0803	0,06743	8,0911	0,1300	1,0374
0,00636172	0,062414	9,810868759	15	50,9	48,1	17,2	19,9	27,1	84,7	14,05	13,960	7,9797	1,0803	0,06743	8,0911	0,0900	0,7182

Tabel A.7 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 12 m/s (d 5 mm)

A	Q	V out Perforated Plate	waktu	T1	T2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	ω outlet	ω inlet	massa udara kering	p udara	m udara	Massa Udara	Δω	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m ³ /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	0,068088	10,70276592	0	51	51	17,1	17,1	27,8	87,6	13,98	13,980	4,3513	1,0800	0,07354	4,4121	0,0000	0,0000
0,00636172	0,068088	10,70276592	1	51	43,8	17,1	31,3	28,2	90,2	17,88	13,980	4,3513	1,0800	0,07354	4,4121	3,9000	16,9700
0,00636172	0,068088	10,70276592	2	51	44,8	17,1	26,8	27,5	86,6	16,1	13,980	4,3513	1,0800	0,07354	4,4121	2,1200	9,2247
0,00636172	0,068088	10,70276592	3	51	45,7	17,1	25	27,5	86,4	15,67	13,980	4,3513	1,0800	0,07354	4,4121	1,6900	7,3536
0,00636172	0,068088	10,70276592	4	51	46,8	17,1	22,9	27,5	86,4	15,2	13,980	4,3513	1,0800	0,07354	4,4121	1,2200	5,3086
0,00636172	0,068088	10,70276592	5	51	47,1	17,1	21,8	27,3	85,4	14,69	13,980	4,3513	1,0800	0,07354	4,4121	0,7100	3,0894
0,00636172	0,068088	10,70276592	7	51	47,5	17,1	20,8	27,1	84,8	14,32	13,980	8,7025	1,0800	0,07354	8,8242	0,3400	2,9589
0,00636172	0,068088	10,70276592	9	51	47,9	17,1	20,3	27,2	85	14,22	13,980	8,7025	1,0800	0,07354	8,8242	0,2400	2,0886
0,00636172	0,068088	10,70276592	11	51	48,1	17,1	20	27,2	85,1	14,14	13,980	8,7025	1,0800	0,07354	8,8242	0,1600	1,3924
0,00636172	0,068088	10,70276592	13	51	48,3	17,1	19,7	27,2	85,1	14,11	13,980	8,7025	1,0800	0,07354	8,8242	0,1300	1,1313
0,00636172	0,068088	10,70276592	15	51	48,5	17,1	19,4	27,2	85,1	14,02	13,980	8,7025	1,0800	0,07354	8,8242	0,0400	0,3481

Tabel A.8 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 13 m/s (d 5 mm)

A	Q	V out Perforated Plate	waktu	T1	T2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	w outlet	w inlet	massa udara kering	p udara	m udara	Massa Udara	Δw	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m ³ /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	0,073762	11,59466308	0	51,5	51,5	16,7	16,7	27,8	87,6	14,02	14,02	4,7063	1,0783	0,07954	4,7723	0,0000	0,0000
0,00636172	0,073762	11,59466308	1	51,5	42,7	16,7	33,6	28,2	90,1	16,24	14,02	4,7063	1,0783	0,07954	4,7723	4,2200	19,8605
0,00636172	0,073762	11,59466308	2	51,5	44,3	16,7	28,2	27,6	87,2	16,53	14,02	4,7063	1,0783	0,07954	4,7723	2,5100	11,8127
0,00636172	0,073762	11,59466308	3	51,5	46,1	16,7	24,1	27,4	86,3	15,45	14,02	4,7063	1,0783	0,07954	4,7723	1,4300	6,7300
0,00636172	0,073762	11,59466308	4	51,5	46,8	16,7	22,1	27,2	85	14,66	14,02	4,7063	1,0783	0,07954	4,7723	0,6400	3,0120
0,00636172	0,073762	11,59466308	5	51,5	47,5	16,7	21,1	27,2	85,3	14,5	14,02	4,7063	1,0783	0,07954	4,7723	0,4800	2,2590
0,00636172	0,073762	11,59466308	7	51,5	47,9	16,7	20,5	27,3	85,4	14,38	14,02	9,4125	1,0783	0,07954	9,5445	0,3600	3,3885
0,00636172	0,073762	11,59466308	9	51,5	48,5	16,7	19,8	27,4	85,9	14,34	14,02	9,4125	1,0783	0,07954	9,5445	0,3200	3,0120
0,00636172	0,073762	11,59466308	11	51,5	48,8	16,7	19,4	27,4	86	14,26	14,02	9,4125	1,0783	0,07954	9,5445	0,2400	2,2590
0,00636172	0,073762	11,59466308	13	51,5	49	16,7	19,2	27,4	86,1	14,19	14,02	9,4125	1,0783	0,07954	9,5445	0,1700	1,6001
0,00636172	0,073762	11,59466308	15	51,5	49,3	16,7	18,8	27,5	86,3	14,15	14,02	9,4125	1,0783	0,07954	9,5445	0,1300	1,2236

Tabel A.9 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas (d 5 mm)

Perforated Plate Diameter 5 mm

No	T	Kecepatan Selongsong	Kecepatan Keluar <i>Perforated Plate</i>	D	ρ	μ	v	Re	Pr	Nud	k	h
	(°C)	(m/s)	(m/s)	(m)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)	(m ² /s)				W/m.K	W/m ² .K
1	323,9	11	9,81	0,007	1,0803	1,9588E-05	0,000018294	3787,227	0,70393	34,88491	0,0279	139,041279
2	324	12	10,702	0,007	1,08	1,9593E-05	0,000018304	4129,431	0,70351	36,33172	0,02814	146,053514
3	324,5	13	11,594	0,007	1,0783	1,9416E-05	0,000018354	4507,152	0,70365	37,86989	0,02806	151,804169

Tabel A.10 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 5 mm)

Perforated Plate Diameter 5 mm

No	T∞	Kecepatan Selongsong	Kecepatan Keluar <i>Perforated Plate</i>	Ts	ρ (A,s)	ρ(A,∞)	hf	hg	hfg	hm
	(°C)	(m/s)	(m/s)	(°C)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(m/s)
1	323,9	11	9,81	313,2	1,0867	1,0803	212,48	2592,6	2380,120	0,09766719
2	324	12	10,702	313,9	1,085	1,08	212,9	2592,8	2379,900	0,12396659
3	324,5	13	11,594	314,5	1,083	1,0783	214,99	2593,7	2378,710	0,13578267

Tabel A.11 Validasi Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 5 mm)

Kecepatan Udara	\dot{m}_a	A_s	T_s	$\rho (A,s)$	$\rho(A,\infty)$	hm	error	error rata-rata
(m/s)	(kg/s)	(m ²)	(°C)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)	(m/s)	(%)	(%)
11	0,0002116	0,448363223	313,2	1,0867	1,0803	0,073723	32,47857	20,70286765
12	0,0003099	0,448363223	313,9	1,085	1,08	0,1382361	10,322585	
13	0,0003546	0,448363223	314,5	1,083	1,0783	0,1682716	19,3074479	

Tabel A.12 Lembar data massa batubara variasi *perforated plate* diameter 10 mm

Perforated Plate Diameter 10 mm						
Menit	v = 11 m/s		v = 12 m/s		v = 13 m/s	
	Massa Basah	Massa Kering	Massa Basah	Massa Kering	Massa Basah	Massa Kering
	gr	gr	gr	gr	gr	gr
0	10,33	7,644	10,531	7,821	11,211	8,321
1	10,986	8,36	10,135	7,999	9,787	7,681
2	10,668	8,4	9,687	7,892	11,391	9,191
3	9,458	7,725	8,457	7,14	11,388	9,437
4	10,38	8,621	9,083	7,795	10,378	8,767
5	10,588	8,955	10,729	9,232	11,555	9,83
7	10,108	8,724	9,311	8,043	10,678	9,2
9	9,702	8,46	8,066	7,05	10,899	9,456
11	10,266	8,97	9,996	8,71	11,248	9,898
13	9,207	8,097	9,891	8,65	9,852	8,631
15	10,416	9,12	9,66	8,564	11,576	10,227

Tabel A.13 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 11 m/s (d 10 mm)

menit	Massa bb basah	massa bb kering	massa wadah	moisture content	drying rate	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(gr / menit)	(g)	(g)
0	10,33	7,644	2,343	33,62964818	0	100,8889	0,0000
1	10,986	8,36	2,163	29,76311912	11,59958717	89,2894	11,5996
2	10,668	8,4	2,138	26,58851114	9,52382395	79,7655	9,5238
3	9,458	7,725	2,156	23,73322377	8,565862089	71,1997	8,5659
4	10,38	8,621	2,148	21,36783285	7,096172781	64,1035	7,0962
5	10,588	8,955	2,147	19,34604905	6,065351403	58,0381	6,0654
7	10,108	8,724	2,149	17,38911924	2,935394715	52,1674	5,8708
9	9,702	8,46	2,164	16,47651897	1,368900398	49,4296	2,7378
11	10,266	8,97	2,158	15,98421312	0,738458772	47,9526	1,4769
13	9,207	8,097	2,149	15,7268348	0,386067488	47,1805	0,7721
15	10,416	9,12	2,161	15,69957601	0,040888174	47,0987	0,0818

Tabel A.14 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 12 m/s (d 10 mm)

menit	Massa bb basah	massa bb kering	massa wadah	moisture content	drying rate	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(gr / menit)	(g)	(g)
0	10,531	7,821	2,361	33,17013464	0	99,5104	0,0000
1	10,135	7,999	2,454	27,80887905	16,08376676	83,4266	16,0838
2	9,687	7,892	2,336	24,41844647	10,17129775	73,2553	10,1713
3	8,457	7,14	2,394	21,72191984	8,089579885	65,1658	8,0896
4	9,083	7,795	2,457	19,43857531	6,850033597	58,3157	6,8500
5	10,729	9,232	2,465	18,11471442	3,971582656	54,3441	3,9716
7	9,311	8,043	1,77	16,81474605	1,949952554	50,4442	3,8999
9	8,066	7,05	1,792	16,19381575	0,931395461	48,5814	1,8628
11	9,996	8,71	1,8	15,69058077	0,754852465	47,0717	1,5097
13	9,891	8,65	1,821	15,377943	0,468956659	46,1338	0,9379
15	9,66	8,564	2,517	15,34369313	0,051374809	46,0311	0,1027

Tabel A.15 Perhitungan sisi batubara pada pengeringan dengan kecepatan udara 13 m/s (d 10 mm)

menit	Massa bb basah	massa bb kering	massa wadah	moisture content	drying rate	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara
	(gr)	(gr)	(gr)	%	(gr / menit)	(g)	(g)
0	11,211	8,321	2,516	33,23749281	0	99,7125	0,0000
1	9,787	7,681	1,834	26,48057337	20,27075833	79,4417	20,2708
2	11,391	9,191	1,83	23,01014538	10,41128396	69,0304	10,4113
3	11,388	9,437	1,771	20,28699179	8,169460791	60,8610	8,1695
4	10,378	8,767	1,848	18,8862837	4,202124242	56,6589	4,2021
5	11,555	9,83	1,816	17,71229079	3,521978745	53,1369	3,5220
7	10,678	9,2	1,813	16,67230682	1,559975948	50,0169	3,1200
9	10,899	9,456	1,802	15,86237221	1,214901921	47,5871	2,4298
11	11,248	9,898	2,414	15,28186552	0,870760037	45,8456	1,7415
13	9,852	8,631	1,706	14,98895163	0,43937083	44,9669	0,8787
15	11,576	10,227	2,569	14,97723992	0,017567562	44,9317	0,0351

Tabel A.16 Lembar data Temperatur dan *Relative Humidity* udara outlet (d 10 mm)

Perforated Plate Diameter 10 mm						
Menit	v = 11 m/s		v = 12 m/s		v = 13 m/s	
	Temperatur	RH	Temperatur	RH	Temperatur	RH
	°C	%	°C	%	°C	%
0	50,2	18,2	50,5	18,3	50,8	17,6
1	45,5	28,1	44,2	30,3	42,9	33
2	46,1	25,5	45,2	27,5	44,5	27,2
3	46,5	24,8	46,2	25,4	46,1	24,4
4	46,8	23,9	46,6	23,5	46,9	22,8
5	47,2	23,1	47,3	22,5	47,4	22
6	47,4	21,6	47,7	21,5	47,7	21,1
7	47,6	20,9	47,9	21	48,1	20,5
8	47,7	20,8	48	20,9	48,2	20,2
9	47,9	20,5	48,1	20,8	48,3	20
10	47,9	20,3	48,2	20,5	48,4	19,9

Tabel A.17 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 11 m/s (d 10 mm)

A	Q	V out Perforated Plate	waktu	T1	T2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	w outlet	w inlet	massa udara kering	p udara	m udara	Massa Udara	Δw	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m ³ /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	0,062414	9,810868759	0	50,2	50,2	18,2	18,2	27,8	88,0	14,35	14,350	3,9961	1,0824	0,06756	4,0534	0,0000	0,0000
0,00636172	0,062414	9,810868759	1	50,2	45,5	18,2	28,1	28,3	90,4	17,36	14,350	3,9961	1,0824	0,06756	4,0534	3,0100	12,0282
0,00636172	0,062414	9,810868759	2	50,2	46,1	18,2	25,5	27,9	88,6	16,34	14,350	3,9961	1,0824	0,06756	4,0534	1,9900	7,9522
0,00636172	0,062414	9,810868759	3	50,2	46,5	18,2	24,8	28,0	88,8	16,25	14,350	3,9961	1,0824	0,06756	4,0534	1,9000	7,5925
0,00636172	0,062414	9,810868759	4	50,2	46,8	18,2	23,9	27,9	88,2	15,90	14,350	3,9961	1,0824	0,06756	4,0534	1,5500	6,1939
0,00636172	0,062414	9,810868759	5	50,2	47,2	18,2	23,1	27,8	87,9	15,65	14,350	3,9961	1,0824	0,06756	4,0534	1,3000	5,1949
0,00636172	0,062414	9,810868759	7	50,2	47,4	18,2	21,6	27,4	85,9	14,78	14,350	7,9921	1,0824	0,06756	8,1068	0,4300	3,4366
0,00636172	0,062414	9,810868759	9	50,2	47,6	18,2	20,9	27,2	85,3	14,45	14,350	7,9921	1,0824	0,06756	8,1068	0,1000	0,7992
0,00636172	0,062414	9,810868759	11	50,2	47,7	18,2	20,8	27,2	85,2	14,40	14,350	7,9921	1,0824	0,06756	8,1068	0,0500	0,3996
0,00636172	0,062414	9,810868759	13	50,2	47,9	18,2	20,5	27,2	85,1	14,38	14,350	7,9921	1,0824	0,06756	8,1068	0,0300	0,2398
0,00636172	0,062414	9,810868759	15	50,2	47,9	18,2	20,3	27,2	85,0	14,36	14,350	7,9921	1,0824	0,06756	8,1068	0,0100	0,0799

Tabel A.18 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 12 m/s (d 10 mm)

A	Q	V out Perforated Plate	waktu	T1	T2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	w outlet	w inlet	massa udara kering	p udara	m udara	Massa Udara	Δw	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m ³ /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	0,068088	10,70276592	0	50,5	50,5	18,2	18,3	26,3	81	14,55	14,550	4,3541	1,0813	0,07362	4,4174	0,0000	0,0000
0,00636172	0,068088	10,70276592	1	50,5	44,2	18,2	30,3	28,3	90,6	17,69	14,550	4,3541	1,0813	0,07362	4,4174	3,1400	13,6718
0,00636172	0,068088	10,70276592	2	50,5	45,2	18,2	27,5	27,7	87,5	16,86	14,550	4,3541	1,0813	0,07362	4,4174	2,3100	10,0579
0,00636172	0,068088	10,70276592	3	50,5	46,2	18,2	25,4	27	84,2	16,38	14,550	4,3541	1,0813	0,07362	4,4174	1,8300	7,9679
0,00636172	0,068088	10,70276592	4	50,5	46,6	18,2	23,5	26,8	83,4	15,45	14,550	4,3541	1,0813	0,07362	4,4174	0,9000	3,9187
0,00636172	0,068088	10,70276592	5	50,5	47,3	18,2	22,5	26,1	80,4	15,33	14,550	4,3541	1,0813	0,07362	4,4174	0,7800	3,3962
0,00636172	0,068088	10,70276592	7	50,5	47,7	18,2	21,5	26,1	80,2	14,93	14,550	8,7081	1,0813	0,07362	8,8348	0,3800	3,3091
0,00636172	0,068088	10,70276592	9	50,5	47,9	18,2	21	26,1	80,3	14,76	14,550	8,7081	1,0813	0,07362	8,8348	0,2100	1,8287
0,00636172	0,068088	10,70276592	11	50,5	48	18,2	20,9	25,9	79,5	14,73	14,550	8,7081	1,0813	0,07362	8,8348	0,1800	1,5675
0,00636172	0,068088	10,70276592	13	50,5	48,1	18,2	20,8	26,1	80,4	14,71	14,550	8,7081	1,0813	0,07362	8,8348	0,1600	1,3933
0,00636172	0,068088	10,70276592	15	50,5	48,2	18,2	20,5	26,1	80,3	14,67	14,550	8,7081	1,0813	0,07362	8,8348	0,1200	1,0450

Tabel A.19 Perhitungan sisi udara pada pengeringan dengan kecepatan 13 m/s (d 10 mm)

A	Q	V out Perforated Plate	waktu	T1	T2	Rh inlet	Rh outlet	T.wb	h	w outlet	w inlet	massa udara kering	p udara	m udara	Massa Udara	Δw	ΔH2O pada Udara
(m ²)	(m ³ /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	0,073762	11,59466308	0	50,8	50,8	17,6	17,6	27,7	87,3	14,23	14,23	4,7149	1,0805	0,07970	4,7820	0,0000	0,0000
0,00636172	0,073762	11,59466308	1	50,8	42,9	17,6	33	27,9	88,8	17,8	14,23	4,7149	1,0805	0,07970	4,7820	3,5700	16,8322
0,00636172	0,073762	11,59466308	2	50,8	44,5	17,6	27,2	27,4	86,4	16,1	14,23	4,7149	1,0805	0,07970	4,7820	1,8700	8,8169
0,00636172	0,073762	11,59466308	3	50,8	46,1	17,6	24,4	27,6	86,9	15,68	14,23	4,7149	1,0805	0,07970	4,7820	1,4500	6,8366
0,00636172	0,073762	11,59466308	4	50,8	46,9	17,6	22,8	27,5	86,6	15,24	14,23	4,7149	1,0805	0,07970	4,7820	1,0100	4,7620
0,00636172	0,073762	11,59466308	5	50,8	47,4	17,6	22	27,5	86,5	15,02	14,23	4,7149	1,0805	0,07970	4,7820	0,7900	3,7248
0,00636172	0,073762	11,59466308	7	50,8	47,7	17,6	21,1	27,4	85,9	14,65	14,23	9,4298	1,0805	0,07970	9,5640	0,4200	3,9605
0,00636172	0,073762	11,59466308	9	50,8	48,1	17,6	20,5	27,5	86,5	14,54	14,23	9,4298	1,0805	0,07970	9,5640	0,3100	2,9232
0,00636172	0,073762	11,59466308	11	50,8	48,2	17,6	20,2	27,5	86,4	14,41	14,23	9,4298	1,0805	0,07970	9,5640	0,1800	1,6974
0,00636172	0,073762	11,59466308	13	50,8	48,3	17,6	20	27,4	86,2	14,34	14,23	9,4298	1,0805	0,07970	9,5640	0,1100	1,0373
0,00636172	0,073762	11,59466308	15	50,8	48,4	17,6	19,9	27,4	86,2	14,28	14,23	9,4298	1,0805	0,07970	9,5640	0,0500	0,4715

Tabel A.20 Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas (d 10 mm)

Perforated Plate Diameter 5 mm

No	T	Kecepatan Selongsong	Kecepatan Keluar Perforated Plate	D	ρ	μ	v	Re	Pr	Nud	k	h
	(°C)	(m/s)	(m/s)	(m)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)	(m ² /s)				W/m.K	W/m ² .K
1	323,9	11	9,81	0,007	1,0803	1,959E-05	1,8294E-05	3787,227	0,70393	34,8849087	0,0279	139,041279
2	324	12	10,702	0,007	1,08	1,959E-05	1,8304E-05	4129,431	0,70351	36,3317198	0,02814	146,053514
3	324,5	13	11,594	0,007	1,0783	1,942E-05	1,8354E-05	4507,152	0,70365	37,8698924	0,02806	151,804169

Tabel A.21 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 10 mm)

Perforated Plate Diameter 5 mm

No	T∞	Kecepatan Selongsong	Kecepatan Keluar Perforated Plate	Ts	ρ (A,s)	ρ(A,∞)	hf	hg	hfg	hm
	(°C)	(m/s)	(m/s)	(°C)	(kg/m ³)	(N.s/m ²)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(m/s)
1	323,9	11	9,81	313,2	1,0867	1,0803	212,48	2592,6	2380,120	0,09766719
2	324	12	10,702	313,9	1,085	1,08	212,9	2592,8	2379,900	0,12396659
3	324,5	13	11,594	314,5	1,083	1,0783	214,99	2593,7	2378,710	0,13578267

Tabel A.22 Validasi Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (d 10 mm)

Kecepatan Udara (m/s)	\dot{m}_a (kg/s)	A_s (m ²)	T_s (°C)	$\rho(A,s)$ (kg/m ³)	$\rho(A,\infty)$ (N.s/m ²)	hm (m/s)	error (%)	error rata-rata (%)
11	0,0002116	0,448363223	313,2	1,0867	1,0803	0,073723	32,47857	20,70286765
12	0,0003099	0,448363223	313,9	1,085	1,08	0,1382361	10,322585	
13	0,0003546	0,448363223	314,5	1,083	1,0783	0,1682716	19,3074479	

Foto Eksperimen Tampak Atas

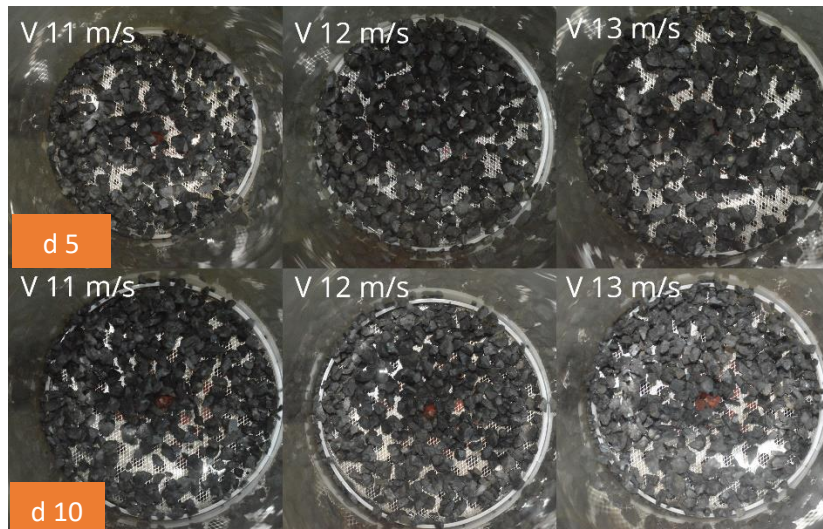
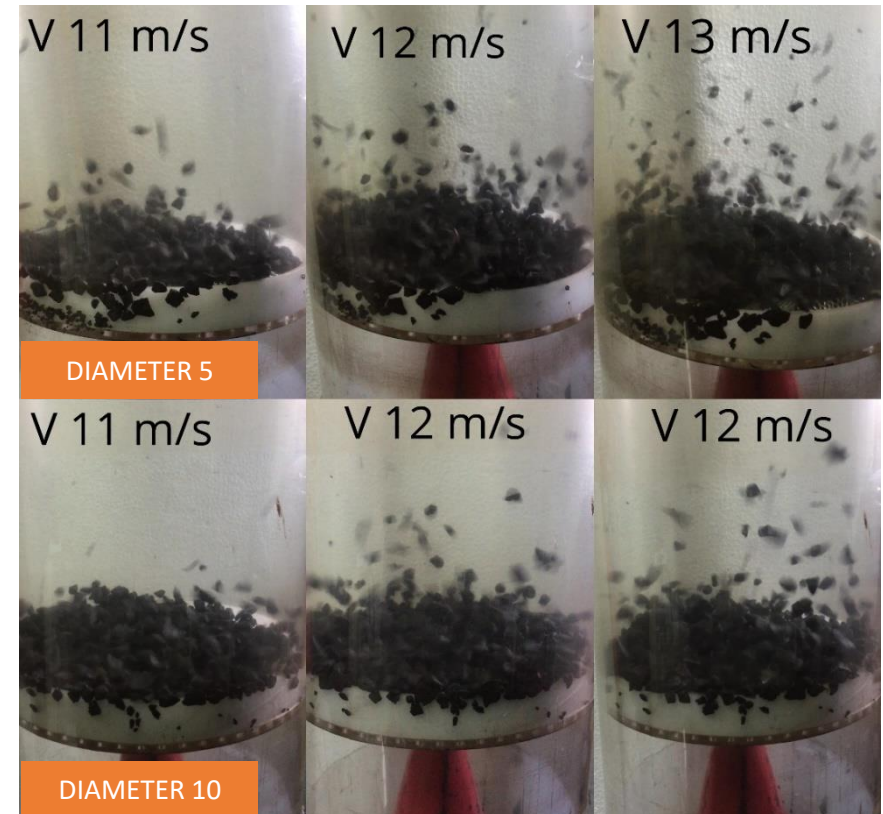


Foto Eksperimen Tampak Samping



BIODATA PENULIS



Penulis mempunyai nama lengkap Nugroho Tri Hutomo, dia lahir di Ponorogo pada tanggal 26 September 1995. Dia anak ke-3 dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Beringin Putra, SDN 4 Gemaharjo, SMPN 1 Ponorogo, SMAN 2 Ponorogo.

Pada tahun 2013 penulis mengikuti ujian masuk program studi D3 Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya. Penulis mengambil program keahlian Konversi Energi dan mengambil tugas akhir termodinamika dan perpindahan panas.

Selama kuliah di D3 Teknik Mesin FTI-ITS, penulis selain beraktivitas sebagai mahasiswa juga aktif di organisasi yaitu Staff Departemen Komunikasi dan Informasi HMDM 2014-2015. Kemudian menjadi Kepala Departemen Komunikasi dan Informasi HMDM 2015-2016 serta panitia kegiatan dan pelatihan maupun lomba yang diadakan di tingkat Jurusan, Fakultas dan Institut. Selain itu, selama kuliah di S1 Teknik Mesin FTI-ITS, penulis juga mengikuti pelatihan manajemen energi ISO 50001:2011 dan pelatihan Autodesk Inventor Professional 2014. Untuk semua informasi dan masukan dapat menghubungi penulis melalui email nugrohohutomo73@gmail.com.