



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH KECEPATAN
INLET DRYING CHAMBER TERHADAP LAJU
PENGERINGAN BATUBARA *LOW-RANK* PADA
*SWIRLING FLUIDIZED BED DRYER***

**STEVANUS FRANCISCUS WAHYUDI N.
NRP 2110 100 092**

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

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - TM 141585

***EXPERIMENTAL STUDY OF VELOCITY
EFFECT OF INLET DRYING CHAMBER
TOWARDS DRYING RATE OF LOW-RANK
COAL USING SWIRLING FLUIDIZED BED
DRYER***

**STEVANUS FRANCISCUS WAHYUDI N.
NRP 2110 100 092**

Supervisor

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

*Mechanical Engineering Departement
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014*

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH KECEPATAN
INLET DRYING CHAMBER TERHADAP LAJU
PENGERINGAN BATUBARA LOW-RANK PADA
SWIRLING FLUIDIZED BED DRYER**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada
Bidang Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

STEVANUS FRANCISCUS WAHYUDI N.
NRP. 2110100092

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng..... (Pembimbing)
(NIP. 196505051990031005)
2. Ir. Kadarisman (Penguji I)..... (Penguji I)
(NIP. 194901091974121001)
3. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT..... (Penguji II)
(NIP. 197301161997021001)
4. Dr. Bambang Arip D., ST, M.Eng..... (Penguji III)
(NIP. 195001191978031002)

SURABAYA
JULI, 2015

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH KECEPATAN INLET DRYING CHAMBER TERHADAP LAJU PENGERINGAN BATUBARA *LOW-RANK* PADA SWIRLING FLUIDIZED BED DRYER

Nama Mahasiswa : Stevanus Franciscus Wahyudi N.
NRP : 2110 100 092
Jurusan : Teknik Mesin, FTI
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

Abstrak

Salah satu sumber penghasil energi listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Di Indonesia hampir semua PLTU menggunakan batubara kalori menengah dan rendah sebagai bahan bakar utama yang memiliki kandungan moisture tinggi. Penggunaan batubara dengan nilai kalori rendah dan memiliki moisture tinggi pada PLTU akan menurunkan efisiensi dari pembangkit dan dapat berpengaruh terhadap kinerja pulverizer yang akan semakin berat dikarenakan kapasitas batubara yang dibutuhkan untuk pembakaran di boiler semakin banyak. Hal tersebut terjadi karena kualitas batubara yang tersedia tidak sesuai dengan spesifikasi desain awal boiler dimana menggunakan batubara kalori tinggi. Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu teknologi pengeringan yang dapat meningkatkan kualitas batubara, swirling fluidized bed coal dryer merupakan salah satu teknologi model pengeringan batubara dengan prinsip fluidasi dimana udara disirkulasikan sehingga membentuk cyclone untuk mengeringkan.

Penelitian dilakukan dengan mengeringkan batubara menggunakan alat yang sudah dirancang oleh peneliti sebelumnya. Pengeringan dilakukan dengan metode Swirling Fluidized Bed Dryer dengan prinsip fluidisasi. Udara panas dihembuskan oleh blower ke dalam chamber dengan melewati

blade yang membentuk sudut 100 sehingga menyebabkan swirling pada udara didalam chamber. Pengambilan data dilakukan dengan menimbang berat batubara setiap satu menit sebanyak 5 kali , dua menit sebanyak 3 kali, dan lima menit sebanyak 4 kali. Percobaan dilakukan dengan menggunakan variasi kecepatan fluidisasi minimum 100%, 125%, 150% dari umf, batubara tipe low rank, ukuran partikel batubara 6mm, dengan massa batubara sebanyak 600 gram, pengeringan dilanjutkan menggunakan oven electric dengan temperatur 104-110 °C selama 1 jam (menurut standard ASTM D 3173)

Hasil yang didapatkan dari experimen ini adalah analisa laju perpindahan panas dan massa, dan laju pengeringan. Ketiga variasi kecepatan yang diplot dalam grafik relative humidity, temperature outlet, moisture content, selisih humidity ratio, selisih massa uap air, drying rate, perbandingan massa air yang dilepas batubara dan diterima udara, dan psychometric chart.

Kata kunci : Swirling Coal Dryer, Fluidisasi, Psychometric

**EXPERIMENTAL STUDY OF VELOCITY EFFECT OF
INLET DRYING CHAMBER TOWARDS DRYING RATE OF
LOW-RANK COAL USING SWIRLING FLUIDIZED BED
DRYER**

Name : *Stevanus Franciscus Wahyudi Notohardjo*
NRP : *2110 100 092*
Department : *Mechanical Engineerig FTI-ITS*
Supervisor : *Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng*

Abstract

One source of electrical energy is Steam Power (power plant). In Indonesia, almost all of the power plant using medium and low grade coal as the main fuel that has a high moisture content. The use of coal with low calorific value and has a higher moisture in the plant will reduce the efficiency of the plant and can affect the performance of pulverizer that will be more severe due to the capacity of coal required for combustion in the boiler increase. That case occure because the quality of coal that is available does not correspond to the initial design specification boiler which uses high calorie coal. Under these conditions, we need a drying technology which can improve the quality of coal, coal swirling fluidized bed dryer is one of the coal drying technology models with a fluidizing principle where air is circulated to form cyclone to dry.

The study was conducted by drying the coal using a tool that has been designed by previous researchers. Drying is done by methods Swirling Fluidized Bed Dryer with fluidization principle. Hot air is blown by the blower into the chamber by passing the blade at an angle of 10 degree, causing swirling in the air inside the chamber. Data collection was performed by weighing coal every one minute as many as 5 times, two minutes 3 times, and five minutes for 4 times. Experiments conducted using minimum fluidization velocity variations of 100%, 125%,

150% of the U_{mf} , the type of low-rank coal, coal particle size 6mm, with a mass of 600 grams of coal, electric drying oven with continued use temperature 104-1100 C for 1 hour (according to ASTM D 3173)

Results obtained from this experiment is the analysis of the rate of heat and mass transfer, and the rate of drying. The third variation of speed is plotted in the graph relative humidity, the outlet temperature, moisture content, humidity ratio difference, the difference between the mass of moisture, drying rate, the ratio of the mass of water discharged and received air coal, and psychometric chart.

Keywords : Swirling Coal Dryer, Fluidized, Psychometric Chart

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis haturkan ke hadapan Tuhan Yesus yang atas Anugerah-Nya sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul

“Studi Eksperimen Pengaruh Kecepatan *Inlet Drying Chamber* Terhadap Laju Pengeringan Batubara *Low-Rank* Pada *Swirling Fluidized Bed Dryer*”.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Bapak **Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng** selaku dosen pembimbing yang dengan sabar dan tidak henti-hentinya memberikan arahan, dukungan, motivasi, pengalaman hidup dan ilmu yang tak ternilai harganya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Tanpa kesabaran Bapak Penulis yakin tugas akhir ini tidak akan selesai pada waktu yang tepat.
2. Bapak **Ir. Kadarisman, Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT, Dr. Bambang Arip Dwiyantoro, ST. M.Eng, Giri Nugroho ST, M.Sc.** selaku dosen penguji seminar proposal Tugas Akhir maupun sidang Tugas Akhir atas semua kritik, saran dan masukan dan sempat meluangkan banyak waktunya bagi penulis sehingga penulisan tugas akhir ini bisa menghasilkan hasil yang lebih baik.
3. **Orangtuaku tercinta Wahyudi Notohardjo dan Sindrianita**, selaku orang tua yang paling saya cintai di dunia ini dan yang senantiasa memberikan semua hal yang terbaik bagi penulis (semangat, moral, dukungan, dana, dan doanya), sehingga bisa menyelesaikan masa studi selama 5 tahun dan tugas akhir ini dengan baik. Kalian merupakan motivasi yang paling utama dalam hidupku.

4. Bapak **Ir. Sudijono Kromodihardjo, M.Sc, Ph.D** selaku dosen wali penulis selama di Teknik Mesin FTI-ITS, yang karena jasanya penulis bisa mengatur jadwal dan pengambilan mata kuliah penulis dalam bidang akademik, dan selalalu memberi wawasan tentang dunia kerja ke depannya.
5. **Saudaraku M53**, yang selalu kompak dan ceria dan memberikan rasa kebersamaan dan dukungan selama perkuliahan di Teknik Mesin ITS ini harapan saya kalian semua dapat mencapai tujuan kalian yang lebih besar lagi setelah mengakhiri studi di kampus ini.
6. **LASKAR PERPAN**, mulai dari senior (**mas Colbud, mas Daniel, Bang Ucup, Bagus dkk**), teman seangkatan (**Yaumal, Aji, David, Rury, Faisal, Prisma, Ardian, Rasyid dkk**) dan angkatan junior (**Soleh, Bobby, Rofia, Rici, Cerri, Rony, Sekar, Raymond, Erva, Supri dkk**) , yang menemani Penulis saat-saat mengerjakan Tugas Akhir di Laboratorium Perpindahan Panas siang hari, malam hari hingga dini hari.
7. **PMK MESIN ITS**, mulai dari senior (**kak daniel, kak Aan, kak Filipus dkk**) teman seangkatan (**Esthi, Ruben, Roy, David, Peter dkk**) dan Junior (**Satria, Romario, Anang, Moses, Romi dkk**) yang selalu memberikan kenangan dalam perjalan perkuliahan.
8. **Teman Leader Penilikan Gereja Mawar Sharon (Ko Raymond Sebastian, Ce Dewi Indrawati, Yustina Yonatan)** dan teman **Connect Group** dari tahun 2010 hingga sekarang (**Dero, Arya, Yenny, William, Maretha, Roni, Nia**) terima kasih telah memberikan doa dan dukungan secara moral. Semoga tali persaudaraan kita selalu erat atas dasar kasih
9. **Teman-teman perempuan dari Kost Doho 23** mulai dari **Rheanita Silvilia, Nike Ratnasari, Ce Erlina**) yang selalu memberi semangat menemani perjalanan selama pengerjaan

tugas akhir sampai selesai dan mau mendengarkan curhat dan cerita saya.

10. Tidak lupa saya ucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Penulis mengharapkan kritik serta saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Agustus 2015

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
<i>TITLE PAGE</i>	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xviii
DAFTAR SIMBOL	xx

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
1.6 Sistematika Penulisan.....	7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori.....	9
2.1.1 <i>Swirling Fluidized Coal Dryer</i>	9
2.1.2 Proses Pengeringan.....	11
2.1.3 Prinsip <i>Psychometric</i>	14
2.1.4 Prinsip Perpindahan Panas dan Massa.....	18
2.1.5 Standard Pengeringan ASTM D3173	21
2.2 Penelitian Terdahulu.....	23
2.2.1 Levy, dkk	23
2.2.2 Pengfei Zhao, Yuemin Zhao, Zhenfu Luo, Zengqiang Chen, Chenlong Duan, Shulei Song.....	26

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Instalasi Penelitian.....	33
-------------------------------	----

3.2 Variabel Penelitian	35
3.3 Peralatan Penunjang Pengujian Sistem Pengering	35
3.4 Metodologi Eksperimen	38
3.4.1 Tahap Persiapan	38
3.4.2 Tahap Pengamatan	40
3.5 <i>Tahap Analisa dan Pengolahan Data Experimen</i>	42
3.5.1 Pengolahan Data Parameter Batubara	43
3.5.2 Pengolahan Data Parameter Udara Pengering	43
3.6 Lembar Pengambilan Data	45
3.7 Diagram Alir Penelitian	46
3.8 Diagram Alir Pengambilan Data	47

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Percobaan	49
4.2 Contoh Perhitungan	49
4.2.1 Menghitung Kecepatan Fluidisasi Udara	50
4.2.2 Menghitung Debit Udara (Q)	51
4.2.3 Menghitung <i>Moisture Content</i>	51
4.2.4 Menghitung <i>Drying Rate</i>	51
4.2.5 Menghitung <i>Humidity Ratio</i>	52
4.2.6 Menghitung Koefisien Perpindahan Panas dan Massa Secara Konveksi	52
4.3 Analisa dan Pembahasan Hasil Eksperimen	54
4.3.1 Analisa Udara Pengering dengan <i>Psychometric Chart</i>	54
4.3.2 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap <i>Relative Humidity</i> Keluar <i>Chamber</i>	56
4.3.3 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap <i>Temperature Keluar Chamber</i>	58
4.3.4 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Δ Massa Batubara	60
4.3.5 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap <i>Moisture Content</i> Batubara	61
4.3.6 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap <i>Drying Rate</i> ..	62
4.3.7 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap <i>Grafik Drying Rate vs Moisture Content</i>	63

4.3.8 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Selisih <i>Humidity Ratio</i> ($\Delta\omega$).....	65
4.3.9 Analisa Perbandingan Massa Uap Air dari Batubara dengan Kandungan Uap Air pada Udara (Kecepatan 3 m/s).....	66
4.3.10 Analisa Perbandingan Massa Uap Air dari Batubara dengan Kandungan Uap Air pada Udara (Kecepatan 2,5 m/s).....	67
4.3.11 Analisa Perbandingan Massa Uap Air dari Batubara dengan Kandungan Uap Air pada Udara (Kecepatan 2 m/s).....	69
4.3.12 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa.....	70

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	77

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Konsumsi dan Produksi Batubara di Indonesia.....	2
Tabel 2.1	<i>Proximate Analysis Chinese Lignite Coal</i>	27
Tabel 3.1	Lembar Pengambilan Data	45
Tabel 4.1	Data Temperature dan <i>Relative Humidity</i> Keluar <i>Chamber</i>	54

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

v	Kecepatan (m/s)
t	Waktu (s)
A	Luas (m ²)
T	Suhu , °C
RH	<i>Relative Humidity</i> (%)
h	Enthalpi (kJ/kg)
ω	<i>Humidity Ratio</i> (g/kg)
m	massa (g)
MC	<i>Moisture Content</i> (%)
ρ	Massa Jenis (kg/m ³)
\dot{m}	Laju alir massa (kg/s)

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Roadmap Sasaran Bauran Energi Nasional.....	3
Gambar 1.2	Distribusi Kualitas Batubara di Indonesia.....	4
Gambar 2.1	<i>Swirling Fluidized Bed Coal Dryer</i>	9
Gambar 2.2	<i>Drag Force</i> dan Gaya Berat.....	10
Gambar 2.3	Proses Pengeringan pada <i>Psychrometric Chart</i> .	12
Gambar 2.4	Kurva Periode Proses Pengeringan.....	13
Gambar 2.5	Proses-proses di dalam Diagram Psikometrik...	15
Gambar 2.6	Sketsa Alat Eksperimen Penelitian Levy dkk	23
Gambar 2.7	Grafik Pengaruh Pengeringan Batubara Terhadap Penghematan.....	24
Gambar 2.8	Grafik Pengaruh Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara.....	25
Gambar 2.9	Grafik Pengaruh Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara yang berbeda jenis.....	26
Gambar 2.10	Instalasi Percobaan <i>Vibration Fluidized Bed Dryer</i>	27
Gambar 2.11	Grafik karakteristik pengeringan dengan variasi temperatur <i>air inlet</i>	28
Gambar 2.12	Grafik karakteristik pengeringan dengan variasi ukuran partikel.....	30
Gambar 3.1	Instalasi Alat Percobaan.....	33
Gambar 3.2	Skema Alat Percobaan pada <i>Drying Chamber</i> ...	34
Gambar 3.3	Alat Percobaan <i>Swirling Fluidized Bed Coal Dryer</i>	34
Gambar 3.4	Thermocouple Tipe K.....	37
Gambar 3.5	<i>Thermometer Digital</i>	37
Gambar 3.6	<i>Thermocontrol</i>	37
Gambar 3.7	<i>Water Heater</i>	37
Gambar 3.8	<i>Digital Relative Humidity</i>	37
Gambar 3.9	<i>Anemometer</i>	37
Gambar 3.10	Alat Ukur Massa.....	38
Gambar 3.11	Oven Pengering.....	38
Gambar 3.12	Peralatan <i>Drying Chamber</i>	38

Gambar 3.13	<i>pump, water heater and water tank</i>	39
Gambar 3.14	Peralatan penghasil udara pengeringan.....	39
Gambar 3.15	Batubara yang digunakan sebagai bahan yang diujikan.....	40
Gambar 3.16	<i>Blower sentrifugal</i>	40
Gambar 3.17	Proses Pengeringan	41
Gambar 3.18	<i>Sample</i>	41
Gambar 3.19	Proses pelepasan <i>moisture content</i> sisa pengeringan.....	42
Gambar 3.20	Proses Penimbangan.....	42
Gambar 4.1	Pengaruh kecepatan terhadap udara pengering dalam <i>psychometric chart</i>	55
Gambar 4.2	Pengaruh kecepatan terhadap <i>relative humidity</i> keluar <i>chamber</i>	56
Gambar 4.3	Pengaruh kecepatan terhadap <i>temperature</i> udara keluar <i>chamber</i>	58
Gambar 4.4	Pengaruh kecepatan terhadap selisih massa batubara (Δm).....	60
Gambar 4.5	Pengaruh kecepatan terhadap <i>moisture content</i> .	61
Gambar 4.6	Pengaruh kecepatan terhadap <i>drying rate</i>	62
Gambar 4.7	Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Grafik <i>Drying Rate vs Moisture Content</i>	63
Gambar 4.8	Pengaruh kecepatan terhadap selisih <i>humidity ratio</i> ($\Delta \omega$).....	65
Gambar 4.9	Perbandingan massa uap air dengan kecepatan 3 m/s.....	66
Gambar 4.10	Perbandingan massa uap air dengan kecepatan 2,5 m/s.....	67
Gambar 4.11	Perbandingan massa uap air dengan kecepatan 2 m/s.....	69
Gambar 4.12	Pengaruh kecepatan terhadap koefisien perpindahan massa	70

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki kekayaan alam yang melimpah khususnya dalam hal energi yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar seperti minyak bumi, gas alam, batubara, dan lain-lain. Batubara merupakan sumber energi yang mengalami pertumbuhan paling cepat di dunia di tahun-tahun belakangan ini lebih cepat daripada gas, minyak, nuklir, air dan sumberdaya pengganti terutama dengan semakin berkurangnya cadangan minyak dunia dan mengakibatkan naiknya harga minyak dunia, sehingga batubara mulai dijadikan sebagai sumber energi primer bagi negara. Pada bulan Desember 2011, cadangan batubara total di Indonesia mencapai 105.187,44 juta ton yang terbagi di pulau-pulau Indonesia terutama Sumatera dan Kalimantan. Batubara adalah salah satu sumber energi yang penting bagi dunia yang sering digunakan pada industri PLTU, semen, tekstil, kertas, metalurgi, dan lain-lain. Batu bara memiliki peranan penting dalam bahan bakar pembangkit untuk menghasilkan listrik hampir 40% di seluruh dunia.

Pemanfaatan batubara sebagai sumber energi di Indonesia mencakup berbagai jenis industri. Konsumsi batubara di Indonesia dapat dilihat pada tabel 1.1

Pada masa mendatang produksi batubara Indonesia diperkirakan terus meningkat, tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (domestik), tetapi juga untuk memenuhi permintaan luar negeri (ekspor). Hal ini mengingat sumber daya batu bara Indonesia yang masih melimpah, tetapi dilain pihak harga BBM yang tetap tinggi menuntut industri yang selama ini berbahan bakar minyak untuk beralih menggunakan batubara.

PRODUKSI, EKSPOR DAN KONSUMSI BATUBARA 2000- 2012				
no.	Tahun	Produksi (ton)	Ekspor (ton)	Konsumsi
1	2000	77040185	58460492	18579693
2	2001	92540460	65281086	27259374
3	2002	103329093	74177926	29151167
4	2003	114278000	85680621	28596489
5	2004	132352025	93758806	36081734
6	2005	152722438	110789700	41350736
7	2006	193761311	143632865	48995069
8	2007	216946999	163000000	61470000
9	2008	240249068	191430218	48926681
10	2009	256181000	198366000	55790000
11	2010	275164196	208000000	67000000
12	2011	290000000	209100000	65000000
13	2012	386000000	304000000	67300000

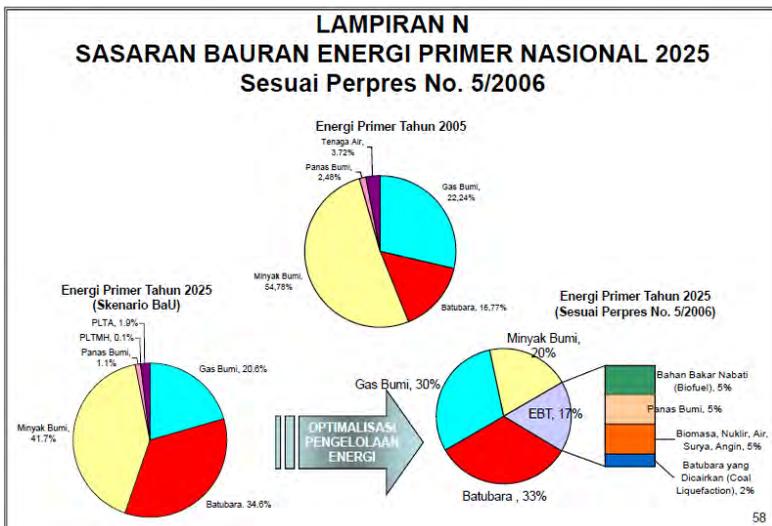
Tabel 1.1. Konsumsi dan Produksi Batubara di Indonesia
(Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral)

Terkait dengan hal tersebut, pemerintah mengeluarkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) melalui Peraturan Presiden No.5 Tahun 2006 yang memiliki tujuan utama untuk menciptakan keamanan pasokan energi nasional secara berkelanjutan dan pemanfaatan energi secara efisien, serta terwujudnya bauran energi (energy mix) yang optimal pada tahun 2025. Untuk itu ketergantungan terhadap satu jenis sumber energi seperti minyak bumi harus dikurangi dengan memanfaatkan sumber energi alternatif diantaranya batubara. Pada tahun 2025 ditargetkan peranan batubara sebesar 33% dari bauran energi nasional menggantikan peran minyak bumi.

Berdasarkan pembagian kualitas, batubara Indonesia ada empat jenis, yaitu :

1. *Batubara Kalori Rendah* adalah jenis batubara yang paling rendah peringkatnya, bersifat lunak-keras, mudah diremas, mengandung kadar air tinggi (10 – 70%), memperlihatkan struktur kayu, nilai kalorinya < 5100 kal/gr.
2. *Batubara Kalori Sedang* adalah jenis batubara yang peringkatnya lebih tinggi, bersifat lebih keras, mudah diremas – tidak bisa diremas, kadar air relatif lebih

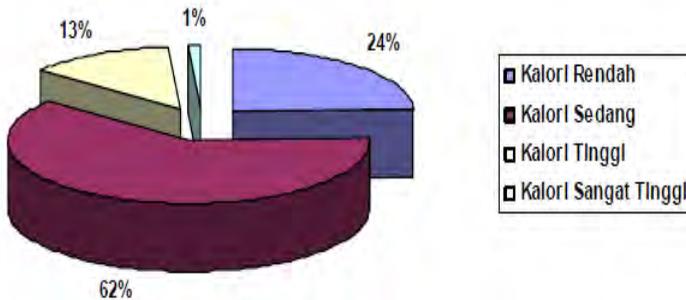
- rendah, umumnya struktur kayu masih tampak, nilai kalorinya 5100 – 6100 kal/gr.
3. *Batubara Kalori Tinggi* adalah jenis batubara yang peringkatnya lebih tinggi, bersifat lebih keras, tidak mudah diremas, kadar air relatif lebih rendah, umumnya struktur kayu tidak tampak, nilai kalorinya 6100- 7100 kal/gr.
 4. *Batubara Kalori Sangat Tinggi* adalah jenis batubara dengan peringkat paling tinggi, umumnya dipengaruhi intrusi ataupun struktur lainnya, kadar air dangat rendah, nilai kalorinya >7100 kal/gr. Kualitas ini dibuat untuk membatasi batubara kalori tinggi.



58

Gambar 1.1 Roadmap Sasaran Bauran Energi Primer Nasional (Sumber: Blue Print Pengelolaan Energi Nasional 2006-2025)

Distribusi kualitas batubara di Indonesia berdasarkan kalori pada tahun 2005 dapat dilihat pada gambar 1.1 berikut ini.



Gambar 1.2 Distribusi Kualitas Batubara di Indonesia Berdasarkan Kalori pada Tahun 2005
(**Sumber:** Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa batubara kalori sedang dan rendah memiliki prosentase yang sangat besar di Indonesia, sementara batubara yang baik harus memiliki kalori tinggi khususnya untuk tujuan penggunaan sebagai bahan bakar. Oleh karena itu harus dilakukan perbaikan kualitas batubara. Saat ini sudah banyak dikembangkan teknologi untuk meningkatkan kualitas dari batubara dari nilai kalor rendah menjadi nilai kalor tinggi. Salah satu teknologi peningkatan kualitas batubara adalah teknologi yang mengurangi kadar air yang terkandung dalam batubara. *Swirling fluidized bed dryer* merupakan salah satu teknologi yang digunakan untuk meningkatkan kualitas batubara dengan meningkatkan nilai kalor melalui proses pengeringan. Keunggulan dari teknologi ini adalah waktu dan laju pengeringan yang cepat, dapat digunakan secara kontinyu dan sesuai untuk material yang berbentuk granular. Teknologi pengering batubara yang juga sering dipakai di industri adalah *rotary dryer*, desain *rotary dryer* terdiri dari *cylindrical shell* yang beputar dengan

kecepatan yang sangat rendah. Pada Rotary Dryer, dua buah media dapat saling berkontak langsung atau tidak berkontak langsung tergantung jenis Rotary Dryer tersebut. Pada direct dryer (dryer dengan kontak langsung) menggunakan gas panas yang dihembuskan memasuki vessel. Pada umumnya jenis dryer ini menggunakan aliran counter, dimana aliran gas panas dan LRC berlawanan arah. Keunggulan rotary dryer adalah memakai aliran counter yang memiliki efisiensi termal yang lebih besar daripada aliran parallel. Kelemahan dari teknologi ini adalah waktu yang dibutuhkan untuk pengeringan relatif lama karena berputar pada kecepatan rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian akan dikaji karakteristik pengeringan pada ruang pengering batubara tipe *swirling fluidized bed* dengan melakukan analisa secara eksperimen pada ruang pengering. Beberapa faktor yang mempengaruhi karakteristik pengeringan adalah temperatur *air heater* dan kecepatan *inlet air heater*. Berdasarkan hal tersebut pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dikaji antara lain:

1. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan *air heater* terhadap karakteristik laju pengeringan dan moisture content pada batubara dengan *drying chamber* tipe *swirling fluidized bed*.
2. Bagaimana perubahan ratio humidity, temperatur dry bulb, wet bulb dan relative humidity pada *psychrometric chart* seiring berjalannya proses pengeringan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik pengeringan pada ruang pengering batubara tipe *fluidized bed* dengan *tube heater* tersusun *aligned*. Selain untuk mengetahui karakteristik pengeringan, penelitian ini juga bertujuan untuk beberapa hal, antara lain:

1. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan *air heater* terhadap karakteristik laju pengeringan dan moisture content pada batubara dengan *drying chamber* tipe *swirling fluidized bed*.
2. Mengetahui ratio humidity, temperatur dry bulb, wet bulb dan relative humidity pada *psychrometric chart* seiring berjalannya proses pengeringan.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian/analisa dan kajian mengarah pada inti masalah sesungguhnya, maka digunakan beberapa batasan masalah dibawah ini:

1. Pada dinding *drying chamber* bersifat adiabatik dan terisolasi sempurna.
2. Sistem beroperasi pada keadaan tunak (*steady state*).
3. Analisa dibatasi pada perpindahan massa antara uap air di permukaan produk dengan udara pengering.
4. Massa batubara sebelum proses pengeringan dianggap sama.
5. Percobaan dilakukan pada temperatur ruang 27 °C.
6. Batubara dianggap berbentuk granular *spherical*.
7. Diameter batubara 6 mm.
8. Beban pengeringan dari batubara konstan.
9. Fluida yang digunakan adalah campuran udara dan uap air, di mana keduanya diasumsikan sebagai gas ideal.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat pada semua pihak. Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Memperkaya dan memperdalam wacana dalam bidang ilmu perpindahan panas dan massa khususnya proses pengeringan.

2. Mengetahui fenomena yang terjadi pada proses pengeringan batubara yang dipengaruhi kecepatan inlet *air heater* di dalam *swirling fluidized bed coal dryer*.
3. Memberikan kontribusi nyata pada pengembangan teknologi perancangan *coal dryer* dengan upaya peningkatan kualitas nilai kalori dari batubara demi terciptanya ketahanan energi nasional.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang dari penelitian ini, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat dari penelitian yang dilakukan, dan sistematika laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu dasar teori dan penelitian terkait yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang menunjang dalam penganalisaan hasil penelitian. Sedangkan penelitian terkait yang sudah ada berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang ada korelasinya dengan penelitian kali ini, yang juga menjadi penunjang dalam analisa data.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menerangkan tentang skema alat percobaan serta langkah-langkah percobaan dan pengambilan data penelitian.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil-hasil perhitungan dari data percobaan, contoh perhitungan, grafik yang sudah dihitung kemudian dianalisa dan didiskusikan lebih lanjut.

BAB V PENUTUP

Bab penutup ini terdiri dari kesimpulan dari hasil penelitian ini dan saran yang perlu diberikan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

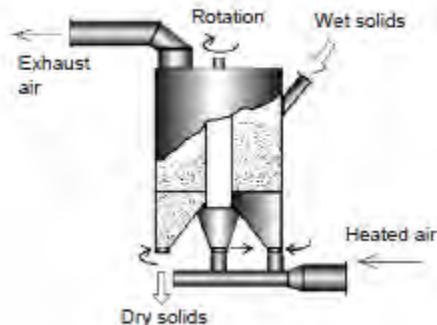
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1 *Swirling Fluidized Coal Dryer*

Swirling fluidized bed dryer merupakan alat pengering batubara dengan prinsip fluidisasi, Fluidisasi merupakan proses pengaliran fluida dalam hal ini udara dengan kecepatan tertentu sehingga mengenai partikel batubara dan menghasilkan *drag force*. Fluidisasi terjadi jika nilai *drag force* yang dihasilkan udara lebih besar dari gaya berat batubara, sehingga menyebabkan batubara melayang. Kecepatan fluida diatur sedemikian rupa sehingga mengakibatkan bahan mengembang dan terjadi fluidisasi. Material fluidisasi dalam bentuk padatan dan media fluidisasi dapat dalam bentuk gas.

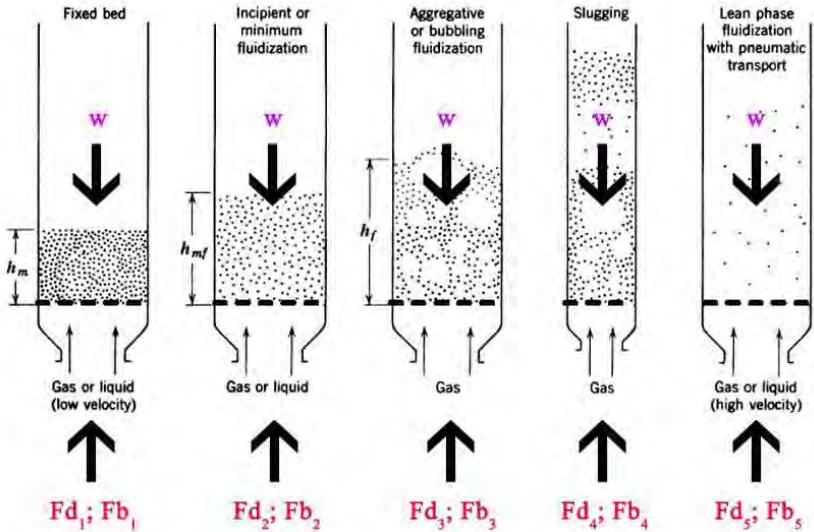


Gambar 2.1 Swirling Fluidized Bed Dryer

(Sumber : *Handbook of Industrial Drying Arun S. Mujumdar*)

Pada sistem ini udara yang bergerak dengan kecepatan tertentu akan diarahkan pada sebuah *blade* yang disusun dengan kemiringan tertentu. Celah antara *blade* yang membentuk sudut ini yang nantinya akan dilewati oleh udara panas sebagai pengering. Kecepatan udara yang melewati *blade* akan

menghasilkan *dragforce* dengan sudut yang hampir sama dengan kemiringan *blade*. *Dragforce* yang dihasilkan akan mendorong dan mengarahkan partikel bergerak sesuai arah kecepatan udara. Apabila proses ini terjadi pada sebuah ruangan berbentuk tabung maka gaya sentrifugal yang menyebabkan partikel berputar seperti *cyclone*.



Gambar 2.2 Drag Force dan Gaya Berat

Perhitungan fluidisasi minimum didapatkan dari Hukum Newton I yaitu:

$$\begin{aligned} \Sigma F &= 0 \\ F_D - W &= 0 \\ F_D &= W \\ \frac{1}{2} \cdot Cd \cdot \rho_{udara} \cdot V^2 \cdot A &= \rho_{batubara} \cdot \nabla \cdot g \end{aligned}$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{batubara} \cdot \nabla \cdot g}{Cd \cdot \rho_{udara} \cdot A}} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana:

F_D = Gaya drag dari batu bara, kg.m/s^2

W = Gaya berat dari batu bara, kg.m/s^2

C_D = Koefisien drag batu bara

V = Kecepatan fluidasi minimum, m/s

A = Luas Permukaan batu bara, m^2

\forall = Volume batu bara, m^3

g = Kecepatan gravitasi, m/s^2

ρ_{batubara} = Massa jenis dari batubara, kg / m^3

ρ_{udara} = Massa jenis dari udara, kg / m^3

2.1.2 Proses Pengeringan

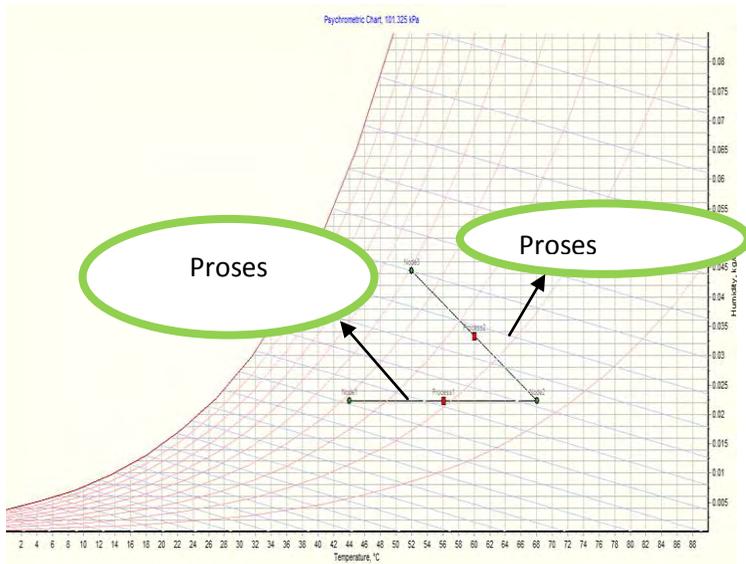
Konsep dasar proses pengeringan adalah proses thermal untuk mengurangi kandungan air atau pelepasan volatiler pada produk solid lewat proses tertentu hingga dicapai kondisi kandungan air pada produk yang diinginkan. Proses pengeringan pada umumnya bertujuan untuk mengurangi kandungan air dalam sebuah produk. Kandungan air yang tidak berlebih akan mempengaruhi kualitas dari sebuah produk. Kelembaban yang ada terjadi dalam fase cair yang terperangkap dalam fase padat atau mikrostruktur padat biasanya disebut sebagai *bound moisture*. Pengeringan yang dilakukan pada batubara bertujuan untuk meningkatkan nilai kalor batubara sehingga pendayagunaan batubara sebagai bahan bakar lebih efisien.

Ada 2 proses yang terjadi pada pengeringan thermal yaitu:

1. Transfer energi panas (*heat transfer*) dari lingkungan sekeliling untuk menguapkan kelembapan permukaan.
2. Transfer massa dari *internal moisture* ke permukaan solid yang diikuti proses penguapan melalui proses *heat transfer*.

Proses pengeringan pada sebuah produk terjadi dalam beberapa tahap. Proses pertama adalah pergerakan air dari dalam menuju lapisan luar produk yang diakibatkan oleh adanya

perbedaan suhu akibat pemanasan yang terjadi selama proses pengeringan. Proses berikutnya adalah penguapan kandungan air pada permukaan produk. Kandungan air yang menguap dari permukaan produk akan tercampur oleh udara pemanas hingga menyebabkan naiknya kandungan air pada udara.



Gambar 2.3. Proses Pengeringan pada *Psychrometric Chart*

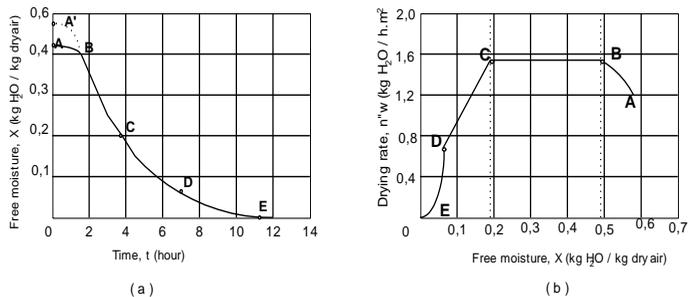
Proses pengeringan dapat digambarkan lewat *psychrometric chart* untuk memudahkan penganalisaan. Pada *psychrometric chart* dapat dilihat kondisi udara selama proses pengeringan terjadi. Pengeringan diawali dengan naiknya temperatur dari udara akibat udara pemanas yang disuplai dalam ruang pengeringan. Proses naiknya temperatur udara dapat dilihat dengan bergesernya titik awal udara ke arah kanan yang ditandai dengan naiknya temperatur *dry bulb* udara. Proses selanjutnya adalah perpindahan massa dengan diuapkannya kandungan air (*water*) dalam produk pengering. Proses penguapan ditandai dengan naiknya titik kondisi udara pemanas pada *psychrometric*

chart ke arah kiri atas. Hal ini sebagai akibat dari naiknya kandungan air dalam udara setelah terjadi proses penguapan air (*water*) dari produk ke udara.

Pada proses pengeringan dapat dibagi menjadi beberapa periode proses. Periode pengeringan digolongkan berdasarkan gejala fisik proses pengeringan yang berbeda tiap waktu. Suatu proses pengeringan terdiri dari tiga periode laju pengeringan, yaitu :

- Periode laju pengeringan menaik
- Periode laju pengeringan konstan
- Periode laju pengeringan menurun

Gambar 2.4 Kurva Periode Proses Pengeringan



Keterangan :

- A - B : periode pemanasan
- B - C : periode laju pengeringan konstan
- C - D : periode laju pengeringan menurun pertama
- C : kadar air kritis
- D - E : periode laju pengeringan menurun kedua

(a) Humidity ratio rate (b) drying rate

<http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/drying5.htm>

a. Periode Laju Pengeringan Naik

Sesaat setelah bahan menerima panas dari udara pengering yang panas, maka temperatur benda yang dikeringkan akan naik hingga mencapai kesetimbangan dengan temperatur wet bulb udara (T_{wb}).

b. Periode Laju Pengerinan Konstan

Pada periode ini (B - C) permukaan bahan jenuh dengan uap air, temperatur uap air pada permukaan sama dengan T_{wb} udara pengering. Selama proses ini berlangsung kecepatan aliran air dari dalam bahan sama dengan kecepatan air yang diuapkan. Proses ini berakhir bila kadar air bebas bahan mencapai titik kritis (critical moisture content). Kadar air kritis adalah kadar air bebas terendah saat laju kecepatan air bebas ke permukaan sama dengan laju penguapan. Pada periode ini proses pengeringan bergantung pada faktor eksternal seperti laju aliran udara dan temperatur udara pengering.

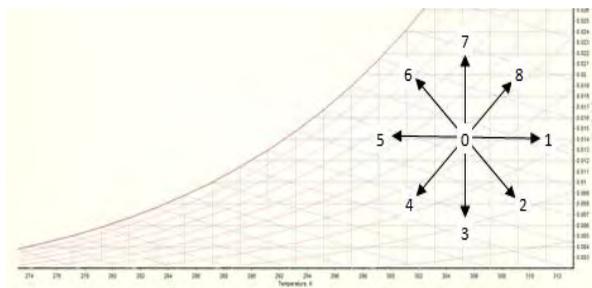
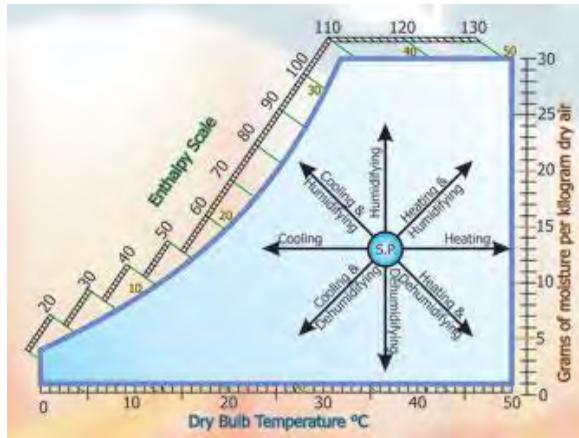
c. Periode Laju Pengerinan Menurun

Titik C adalah kadar air bebas kritis. Pada titik ini air pada permukaan tidak mencukupi untuk mempertahankan lapisan air yang kontinyu. Seluruh permukaan batubara akan terus mengering sampai seluruh permukaan batubara kering pada titik D. Pada fase kedua laju pengeringan menurun yang dimulai pada titik D saat seluruh permukaan batubara telah kering, panas yang tersedia digunakan untuk menguapkan air pada batubara dan selanjutnya karena perbedaan konsentrasi antara dalam dan permukaan maka air tersebut akan bergerak ke permukaan. Jumlah cairan yang diuapkan pada periode ini relatif kecil dan waktu yang diperlukan relatif lama.

2.1.3 Prinsip *Psychometric*

Psikrometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dengan uap air yang mempunyai arti penting dalam proses pengeringan, karena udara pada atmosfer tidak kering tetapi mengandung sejumlah uap. Pada gambar dibawah ini ditunjukkan Diagram Psikrometri yang menunjukkan proses pengeringan pada T_{wb} konstan.

Pada diagram *Psychometric*, dikenal 8 proses yang dialami oleh udara, yaitu:



Gambar 2.5. Proses-proses di dalam Diagram Psikometrik
(Sumber: <http://www.acr-news.com/> the website of air conditioning and refrigeration professionals)

- Proses 0-1 = Proses pemanasan
Proses pemanasan adalah proses penambahan kalor sensibel ke udara sehingga temperatur udara tersebut naik, namun tanpa diikuti perubahan rasio kelembaban.
- Proses 0-2 = Proses pemanasan dan penurunan kelembaban
Pada proses ini udara mengalami pendinginan dahulu sampai temperaturnya dibawah titik embun udara,

pada temperatur ini udara mengalami pengembunan sehingga kandungan uap air akan berkurang. Proses ini terjadi pada alat pengering udara (dehumidifier). Pada proses ini terjadi penurunan rasio kelembaban, entalpi, T_{wb} , entalpi dan kelembaban relatif tetapi terjadi peningkatan T_{db} .

- Proses 0-3 = Proses penurunan kelembaban.
Proses penurunan kelembaban adalah proses pengurangan kandungan uap air ke udara sehingga terjadi penurunan entalpi dan ratio kelembaban. Pada proses ini terjadi perubahan kalor laten tanpa disertai perubahan kalor sensibel.
- Proses 0-4 = Proses pendinginan dan penurunan kelembaban.
Proses ini dilakukan dengan cara melewati udara kedalam chamber yang sudah terisi dengan batubara dimana temperaturnya batubara lebih rendah dari temperatur udara sehingga terjadi penurunan kalor laten dan kalor sensibel.
- Proses 0-5 = Proses pendinginan.
Proses pendinginan adalah proses pengambilan kalor sensibel dari udara sehingga temperatur udara tersebut mengalami penurunan, namun tanpa diikuti perubahan rasio kelembaban.
- Proses 0-6 = Proses pendinginan dan pelembaban.
Proses ini dilakukan dengan melewati udara pada ruangan semburan air yang temperaturnya lebih rendah dari temperatur udara, tetapi lebih tinggi dari titik embun udara sehingga temperatur akan mengalami penurunan dan rasio kelembaban akan mengalami peningkatan.
- Proses 0-7 = Proses pelembaban.
Proses pelembaban adalah proses penambahan kandungan uap air ke udara sehingga terjadi kenaikan

entalpi dan ratio kelembaban. Pada proses ini terjadi perubahan kalor laten tanpa disertai perubahan kalor sensibel.

- Proses 0-8 = Proses pemanasan dan pelembaban. Pada proses ini udara dipanaskan disertai dengan penambahan uap air. Pada proses ini terjadi kenaikan rasio kelembaban, entalpi, T_{db} , T_{wb} dan kelembaban relatif.

Beberapa istilah-istilah yang sering digunakan dalam proses pengeringan antara lain:

- Parameter Proses Pengeringan pada Batubara
 - a. **Moisture content** basis basah didefinisikan sebagai massa air dalam produk dibagi massa produk basah.

$$MC(\%) = \frac{(m_{p,basah} - m_{p,kering})}{m_{p,basah}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1)$$

di mana:

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

$m_{p,basah}$ = massa bahan awal dalam keadaan basah (kg).

$m_{p,kering}$ = massa bahan akhir dalam keadaan kering (kg)

- Parameter Proses Pengeringan pada Udara Pengeri
 - a. **Kelembaban relatif**

Kelembaban relatif adalah perbandingan antara fraksi molekul uap air (tekanan uap air) di dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh (tekanan jenuh uap air) pada temperatur dry bulb dan tekanan yang sama. Dari hubungan untuk gas ideal, kelembaban relatif dapat dinyatakan dengan θ , yaitu:

$$\theta = \frac{P_{uap}}{P_s} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana : P_{uap} = tekanan uap air
 P_s = tekanan jenuh uap air pada temperatur yang sama

b. Rasio Kelembaban

Rasio kelembaban (ω_{ud}) adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Rasio kelembaban udara ditentukan berdasarkan 1 kg udara kering, seperti beberapa sifat yang akan dipelajari.

$$\omega_{ud} = \frac{m_{uap\ air}}{m_{ud}} \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana : ω_{ud} = Rasio kelembaban udara (kg/kg)
 $m_{uap\ air}$ = massa uap air yang terkandung (kg_{uap air})
 m_{ud} = massa udara kering (kg udara kering)

2.1.4 Prinsip Perpindahan Panas dan Massa

Pada proses pengeringan, terjadi perpindahan massa uap air dari batubara ke udara pengering, yang terbagi menjadi dua tahap, yaitu perpindahan massa uap air dari dalam ke permukaan batubara dan perpindahan massa uap air dari permukaan batubara ke udara pengering.

- Perpindahan massa uap air dari permukaan batubara ke udara pengering

Proses ini berlangsung secara konveksi karena adanya aliran udara pengering yang melewati permukaan batubara. (**Incropera, Frank P., DeWitt, Bergman, Lavine.** 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition.* John Wiley & Sons Inc. New York)

$$n_A = h_m \cdot A \cdot (C_{A.s} - C_{A.\infty}) \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

h_m = Koefisien perpindahan massa konveksi (m/s)

$C_{A.s}$ = Konsentrasi uap air di permukaan material (kg mol / m³)

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

n_A = Laju perpindahan Massa (kg/s)

Selanjutnya untuk mencari Schmidt number sebagai berikut

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

dimana:

Sc = *Schmidt Number*

v = viskositas kinematik (m/s²)

D_{AB} = *Mass Diffusivity* (m/s²)

Selanjutnya untuk mencari *Reynolds number* sebagai berikut

$$Re \text{ (Reynolds number)} = \frac{V \cdot D}{v}$$

dimana:

Re = *Reynolds number*

v = viskositas kinematik (m/s²)

D = Diameter batubara

V = kecepatan udara setelah melewati blade (m/s)

Selanjutnya untuk mencari *Sherwood number* sebagai berikut

$$S_h = f(Re, Sc)$$

$$S_h = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}$$

dimana:

S_h = *Sherwood Number*

Re = *Reynold number*

Sc = *Schmith number*

Selanjutnya untuk mencari koefisien perpindahan massa sebagai berikut

$$h_m(\text{koefisien perpindahan massa}) = S_h \frac{D_{AB}}{D}$$

dimana:

S_h = Sherwood number

D_{AB} = Mass Diffusivity (m/s^2)

D = Diameter batubara

- Perpindahan panas dari udara pengering ke batubara
Proses ini berlangsung secara simultan antara perpindahan massa dan perpindahan panas. Pada kondisi *steady*, panas yang berpindah digunakan untuk menguapkan air dari batubara menjadi uap air Sesuai dengan persamaan dibawah ini (**Incropera, Frank P., DeWitt, Bergman, Lavine.** 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition*. John Wiley & Sons Inc. New York)

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

dimana:

q = Kalor (W)

h = Koefisien konveksi, ($W / m^2 \cdot K$)

A = Luas permukaan benda, (m^2)

T_s = Temperatur permukaan material, (K)

T_∞ = Temperature infinity, (K)

Selanjutnya untuk mencari koefisien konveksi sebagai berikut

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

dimana:

Nu = Nusselt Number

k = Konduktivitas thermal udara, ($W / m \cdot K$)

D = Diameter chamber, (m)

Selanjutnya untuk mencari Nusselt Number sebagai berikut:

$$Nu = 2 + 0.6Re_d^{1/2} Pr^{1/3}$$

dimana:

$Nu = Nusselt\ Number$

$Re = Reynold\ Number$

$Pr = Prandtl\ Number$

Selanjutnya untuk menghubungkan koefisien perpindahan panas dan massa digunakan Stanton Number sebagai berikut:

$$StPr^{2/3} = St_m Sc^{2/3}$$

$$\left(\frac{h}{\rho v C_p}\right) Pr^{2/3} = \left(\frac{h_m}{v}\right) Sc^{2/3}$$

$$h_m = \frac{h}{\rho C_p} \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{2/3}$$

dimana:

$St = Stanton\ Number$

$Sc = Schmith\ Number$

$Pr = Prandtl\ Number$

2.1.5 Standard pengeringan ASTM D3173

Proses pengeringan batubara adalah proses untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam batubara tersebut. Namun halnya, untuk menentukan nilai total kandungan *moisture*, diperlukan suatu proses penghabisan *moisture*. Dengan adanya proses ini, maka akan didapatkan nilai persentase kandungan air yang dapat dicari menggunakan persamaan (2.1). Salah satu standar yang dipakai dalam proses penghabisan *moisture* adalah

ASTM D3173 yang berjudul “*Standard Test Method or Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*”. Proses penghabisan moisture yang dilakukan yaitu dengan menggunakan oven. Proses ini dilakukan dengan menghitung hilangnya berat ketika produk dikeringkan tanpa menyisakan kandungan air.

Beberapa peralatan dan persiapan yang harus dilakukan yaitu diantaranya, oven harus memiliki konstruksi sedemikian rupa yaitu memiliki temperature yang uniform disemua bagian dalamnya, lubang aliran udara yang minimal, dan memiliki batas kemampuan pengaturan temperature antara 104 – 110 °C. Udara pengering harus diperbaharui atau dire-sirkulasi dua hingga empat kali dalam satu menit. Pintu oven harus memiliki lubang kira-kira sebesar 3.2 mm di bagian bawahnya untuk mengalirkan udara bebas ke dalam oven. Menyiapkan *capsule* beserta *cover*, *capsule* memiliki ketinggian 22 mm dan diameter 44 mm. *Cover* dibuat dari *flat* aluminum yang *fit* untuk penutup *capsule*. *Capsule* dari kaca juga bisa digunakan. *Capsule* diusahakan sependek mungkin dan juga mudah untuk dipindahkan.

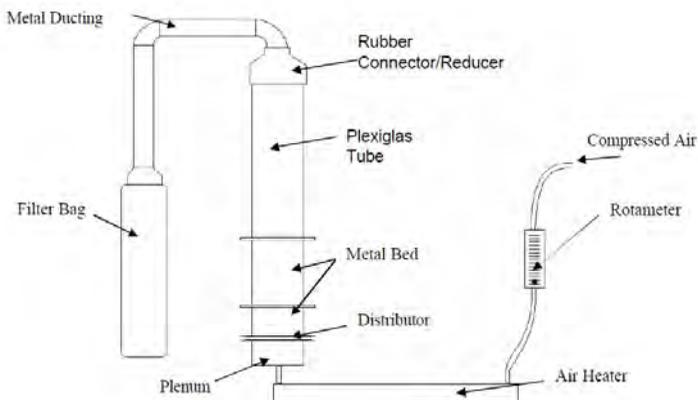
Prosedur yang dilakukan yaitu, pertama memanaskan *capsule* kosong dengan *cover* ditempatkan di atas *capsule*, lalu dinginkan dengan *desiccant* sekitar 15 hingga 30 menit, membuka *cover* dan memasukkan sampel yang akan dikeringkan ke dalam *capsule*, pemasukkan sampel dilakukan dengan spatula dan dilakukan dengan sangat cepat, ukuran per satuan sampel kira-kira seberat 1 g. Setelah itu memasukkan *capsule* berisikan sampel ke dalam oven (104 – 110 °C) selama 1 jam. Buka oven dan tutup *capsule* dengan *cover* secepatnya, lalu didinginkan dengan *desiccant*. Kemudian menimbang berat sampel ketika *capsule* sudah mencapai suhu ruangan.

2.2. Penelitian Terdahulu

2.2.1 Levy, dkk (2006)

Penelitian terkait dengan teknologi pengeringan batubara pernah dilakukan oleh Levy dkk (2006) [6]. Dalam penelitiannya yang berjudul “*Use Of Coal Drying To Reduce Waterconsumed In Pulverized Coal Power Plants*” Levy melakukan penelitian terhadap efek pengeringan batubara dalam upaya untuk mengurangi kandungan air dalam batubara.

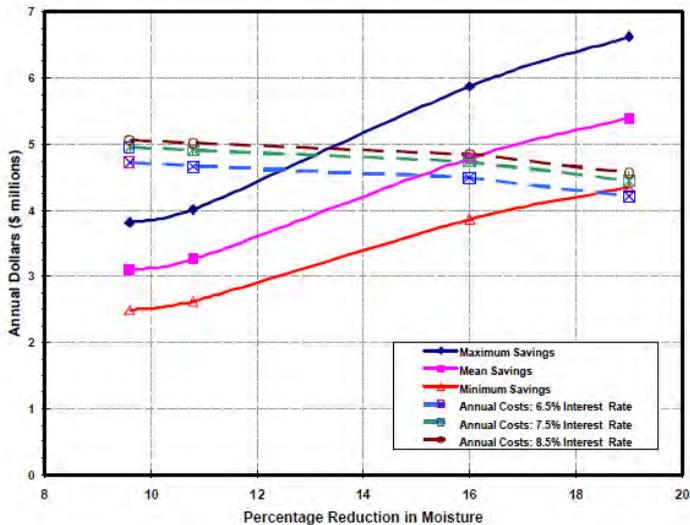
Dalam penelitiannya Levy dkk (2006) [6] merancang sebuah peralatan eksperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara. Pengujian alat eksperimen dilakukan dalam naungan Riset Energi Center Fluidized Bed Laboratory. Ruang pengeringan bertipe *fluidized bed* dengan diameter 6 inci. Udara pemanas dirancang mencapai suhu 150° F dengan kecepatan *velocity inlet* mencapai 1.6 m/s.



Gambar 2.6 Sketsa Alat Eksperimen Penelitian Levy dkk

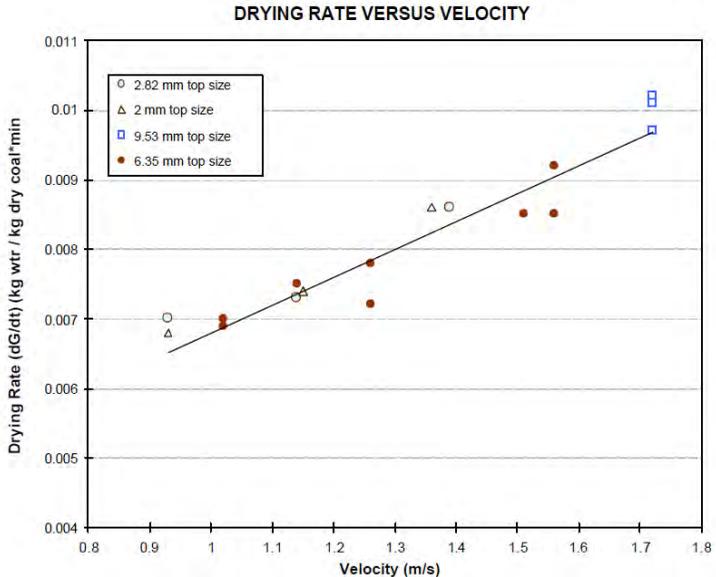
Dari penelitian ini didapatkan hasil penelitian berupa pengaruh pemakaian sistem pengering batubara terhadap keuntungan yang didapatkan dari penghematan yang diciptakan dari proses pengeringan batubara. Kandungan air yang berada di dalam batubara dapat dikurangi dari proses pengeringan. Batubara

akan memiliki nilai kalor yang lebih baik dengan berkurangnya kandungan air (*moisturiser*) dalam batubara. Proses pembakaran dengan bahan bakar batubara dalam proses industri akan lebih baik ketika nilai kalor batubara naik. Pembakaran yang lebih efektif akan meningkatkan efisiensi anggaran suatu industri.



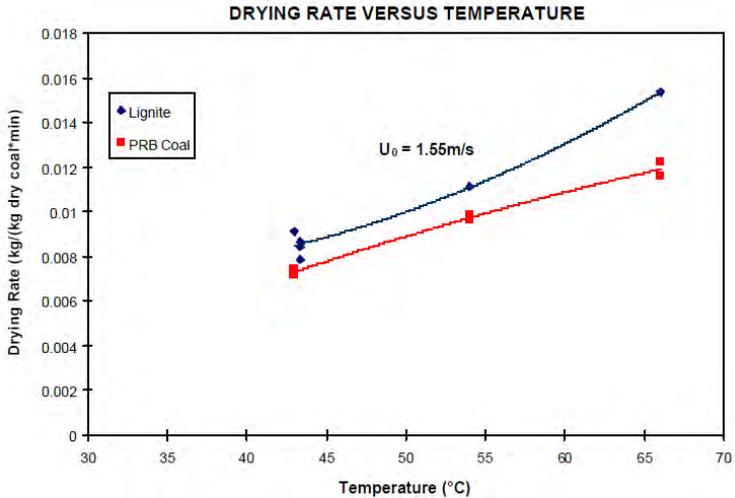
Gambar 2.7. Grafik Pengaruh Pengeringan Batubara Terhadap Penghematan

Dalam penelitiannya **Levy dkk (2006)** juga melakukan penelitian terhadap beberapa faktor yang diduga berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Salah satunya adalah kecepatan udara pemanas yang merupakan variabel yang coba diteliti pengaruhnya terhadap laju pengeringan batubara.



Gambar 2.8. Grafik Pengaruh Kecepatan terhadap Pengeringan Batubara

Berdasarkan data eksperimen pada penelitian yang dilakukan **Levy dkk (2006)**, didapatkan bahwa kecepatan udara pemanas pada sisi masuk ruangan pengering dapat berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Pada penelitian ini kecepatan udara pemanas pada sisi inlet akan meningkatkan laju pengeringan batubara apabila kecepatan ditingkatkan hingga nilai tertentu.



Gambar 2.9. Grafik Pengaruh Kecepatan terhadap Pengerinan Batubara yang berbeda jenis

Pada penelitian yang dilakukan oleh Levy dkk (2006) juga didapatkan pengaruh dari temperature udara pemanas yang akan dilewatkan pada ruangan pengering. Dalam penelitian ini divariasikan temperature udara pemanas dari suhu 43⁰C hingga 66⁰C. Batubara yang digunakan dalam pengambilan data adalah batubara jenis lignite dan batubara subbituminous dari powder river basin (PBR) Pada penelitian ini dapat diketahui bahwa kenaikan temperature udara pemanas akan meningkatkan laju pengeringan batubara.

2.2.2 Pengfei Zhao, Yuemin Zhao, Zhenfu Luo, Zengqiang Chen, Chenlong Duan, Shulei Song

Penelitian terkait dengan teknologi pengeringan batubara pernah dilakukan oleh Pengfei Zhao, dkk. Dalam penelitiannya yang berjudul “Effect of operating conditions on drying of Chinese lignite in a vibration fluidized bed” dilakukan penelitian

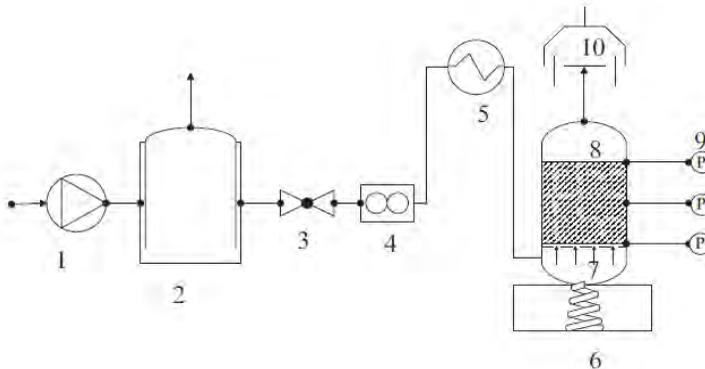
terhadap efek pengeringan batubara kalori rendah (*low rank coal*) dalam upaya untuk mengurangi kandungan air dalam batubara.

Dalam penelitiannya **Pengfei Zhao, dkk** merancang sebuah peralatan eksperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara. Pengujian alat eksperimen dilakukan dengan menggunakan Chinese lignite e sample (Dayan coal in east of Internal Mongolia) dengan proximate analysis seperti pada tabel 2.1 dengan ukuran sample batubara dihancurkan menjadi tiga fraksi massa yaitu 0.5–1, 1–3 dan 1–6 mm. Untuk menentukan *initial moisture*, 2 gram sample dikeringkan dan dioven pada suhu 105 °C selama 2 jam. Ruang pengeringan bertipe *fluidized bed* dengan panjang 0,2 m, lebar 0,4 m, dan tinggi 0,2 m. Udara pemanas dirancang dengan suhu 120⁰ C hingga 200⁰ C dengan kecepatan *velocity inlet* (U_{mf}) 0,58 m/s dengan variasi $1,5 \times U_{mf}$ dan $2,2 \times U_{mf}$.

The proximate and ultimate analysis of Chinese lignite (in wt.%).

Moisture (ad)	Volatile matter (ad)	Ash (ad)	Fixed carbon (ad)	C (ad)	H (ad)	N (ad)	S (ad)	O (ad)
25.85	22.36	22.93	28.86	27.3	3.08	0.93	0.53	8.86

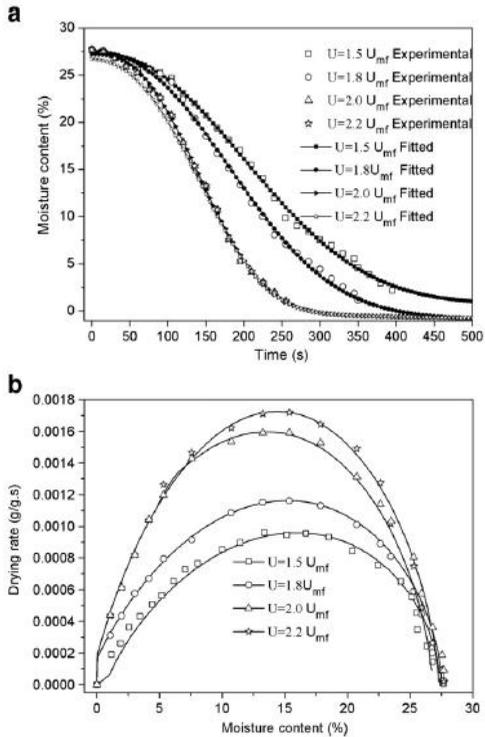
Tabel 2.1 Proximate Analysis Lignite Chinese Coal



Gambar 2.10. Instalasi Percobaan *Vibration Fluidized Bed Dryer*

- Keterangan** :
- | | |
|--------------------|----------------------|
| 1. Gas Blower | 6. Vibration Inducer |
| 2. Tank | 7. Air Distributor |
| 3. Rotameter | 8. Fluidized Bed |
| 4. Katup | 9. Manometer |
| 5. Electric Heater | 10. Bag Filter |

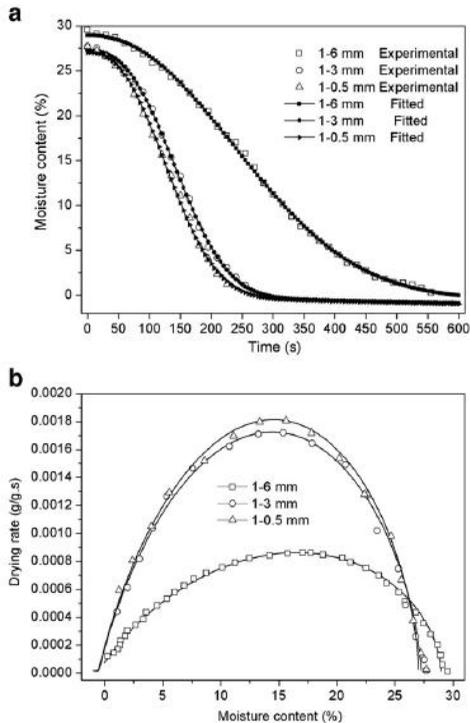
Hasil dari penelitian ini dengan variasi kecepatan air inlet adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 11 Grafik karakteristik pengeringan dengan variasi *superficial air velocity* (particle size: 1–3mm; bedheight: 40mm; inlet air temperature: 160°C; frequency: 30Hz; amplitude: 3mm) (a): moisture content vs. Time dan (b) kurva drying rate

Pada grafik diatas dapat dilihat dengan kenaikan kecepatan udara pengering maka akan menyebabkan pengurangan moisture content yang lebih cepat, dan berpengaruh signifikan terhadap drying rate. Dari hasil ini maka superficial air velocity memiliki pengaruh dalam pengeringan lignite coal karena akan meningkatkan perpindahan panas dan massa antara udara pengering dan partikel batubara. Ketika kecepatan melewati $1,5 u_{mf}$ menuju $1,8 u_{mf}$ dan $1,8 u_{mf}$ menuju $2,0 u_{mf}$ drying rate meningkat drastis sedangkan pada kecepatan dari $2,0 u_{mf}$ menuju $2,2 u_{mf}$ peningkatan drying rate tergolong kecil. Pada hal ini drying rate maksimal terjadi pada kecepatan sekitar $1,8 u_{mf}$ menuju $2,0 u_{mf}$, sehingga peningkatan kecepatan air inlet setelahnya hanya memberi peningkatan kecil pada drying rate.

Dari grafik didapat juga bahwa pengeringan pada kecepatan $2,0 u_{mf}$, membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai moisture content yang sama dibandingkan dengan pengeringan pada temperatur $1,5 u_{mf}$, dan $1,8 u_{mf}$. Sehingga kecepatan inlet yang optimal untuk study ini sebaiknya adalah $2,0 u_{mf}$. Dari sini dapat disimpulkan bahwa kenaikan kecepatan yang relatif tinggi sekalipun tidak terlalu berpengaruh signifikan terhadap drying rate, sehingga demi pertimbangan ekonomi maka harus ditentukan kecepatan maksimum untuk mencapai drying rate yang maksimum juga



Gambar 2. 12 Grafik karakteristik pengeringan dengan variasi ukuran partikel (bed height: 40 mm; inlet air temperatur 160 °C; air velocity: 1.18 m/s; frequency: 30 Hz; amplitude: 3 mm) (a): moisture content vs. Time dan (b) kurva drying rate

Pada grafik diatas dapat dilihat pada partikel dengan ukuran terbesar yaitu 1-6 mm memiliki drying rate yang terkecil, untuk partikel 1-3 mm dan 1- 0,5 mm memiliki ukuran drying rate yang tidak jauh berbeda meskipun masih lebih besar partikel ukuran 1-0,5 mm pada kecepatan yang sama yaitu 1,18 m/s. Pada hal ini drying rate yang optimal terjadi ukuran partikel sekitar 1-3, sehingga pengecilan ukuran dibawah 1 mm setelahnya hanya memberi peningkatan kecil pada drying rate.

Dari grafik diatas juga didapat bahwa ukuran partikel 1-3 mm dan 1-0,5 mm memiliki waktu pengeringan yang lebih singkat daripada ukuran 1-6 mm. Hal ini dikarenakan ukuran partikel yang lebih kecil mempunyai tingkat fluidisasi yang lebih tinggi daripada ukuran partikel besar hingga ke bagian atas bed dryer sehingga pengeringan akan terjadi lebih cepat karena pengaruh dari gaya drag dan kecepatan fluidisasi pada partikel. Sehingga didapat ukuran partikel yang optimal untuk eksperimen ini adalah 1-3 mm.

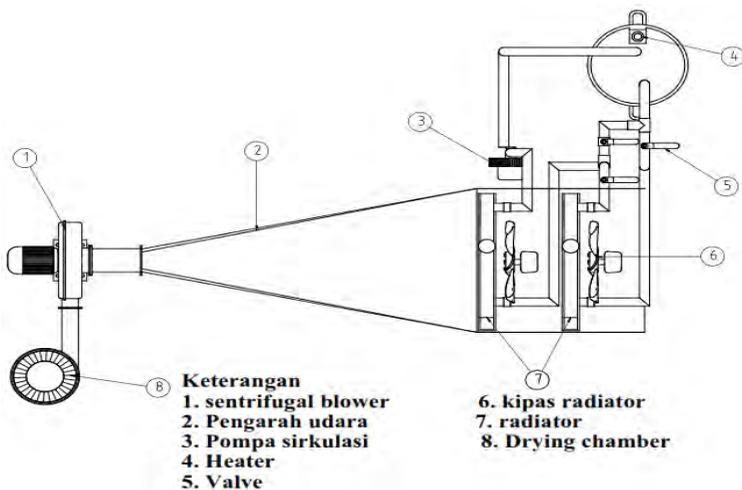
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

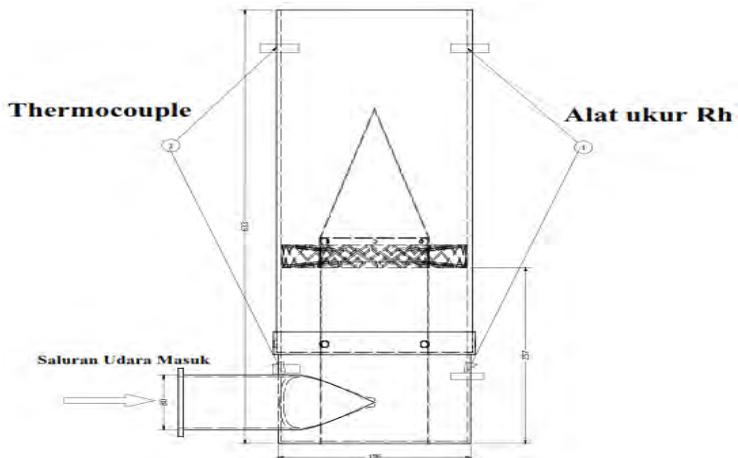
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Instalasi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan mengadakan pengamatan dan pengukuran secara langsung model uji *fluidized bed coal dryer* dengan radiator yang dialiri air sebagai *heat exchanger* sebelum aliran memasuki *drying chamber*. Fluida yang digunakan sebagai pengering adalah udara yang dipanasi menggunakan radiator *heat exchanger* yang dijaga konstan temperaturnya. Gambaran instalasi sederhana dapat dilihat seperti skema berikut:



Gambar 3.1 Instalasi Alat Percobaan



Gambar 3.2 Skema Alat Percobaan pada *Drying Chamber*



Gambar 3.3 Alat Percobaan *Swirling Fluidized Bed Coal Dryer*

3.2. Variabel Penelitian

Dalam suatu penelitian diperlukan variabel-variabel yang terkait di dalamnya. Hal ini dimaksudkan agar penelitian mempunyai arah dan tujuan yang jelas mengenai hubungan yang akan dicari dalam suatu penelitian. Variabel-variabel yang akan ditentukan antara lain :

Variabel bebas	: Kecepatan udara inlet
Variabel control	: Domain drying chamber, blade, diameter batubara, massa batubara, nilai kalor (≤ 5000 kcal/kg), temperatur.
Dimensi chamber	: Diameter luar 200 mm, Diameter dalam 190 mm, Tinggi 650 mm
Suplay udara	: Menggunakan blower sentrifugal dengan daya 750 watt Debit max 1100 m ³ /jam, 2500 rpm. Untuk pengaturan kecepatan digunakan voltage regulator.
Water heater	: Heater yang digunakan total mencapai 2900 watt
Water Tank	: Kapasitas ± 40 liter
Penukar panas	: 2 buah radiator diseri, dan 2 buah kipas.
Batubara	: Untuk messing batu bara dilakukan dengan ayakan yang mempunyai ukuran 6mm, batu bara di asumsikan berbentuk granular (butiran).

3.3 Peralatan Penunjang Pengujian Sistem Pengering

Selain peralatan utama, diperlukan peralatan-peralatan penunjang dan alat ukur yang dibutuhkan untuk pengambilan data primer yang antara lain adalah:

a. *Thermocouple*

Thermocouple yang dipasang terdapat 4 buah.
Thermocouple yang digunakan adalah jenis K, buatan

USA, merek Fluke, dan mempunyai range pengukuran suhu mulai 0-400°C.

b. *Digital Thermometer*

Digital Thermometer yang digunakan merupakan buatan dari Martindale Electric UK, tipe input Twin K, dan mempunyai range pembacaan -50°C-1300°C.

c. *Thermocontrol*

Thermocontrol yang digunakan merupakan buatan dari J.E.W Electric Heating Equipment, tipe IL-70.

d. *Water Heater*

Pemanas air yang digunakan merupakan elemen pemanas bertegangan 220 Volt.

e. *Digital Relative Humidity*

merupakan alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kelembapan udara. Digital Relative Humidity yang digunakan adalah tipe THD 5 dengan spesifikasi :

- *Humidity Range* = 10%RH – 99%RH
- *Temperature Range* = -50°C - 70°C

f. *Anemometer Analog*

Merupakan alat ukur untuk mengukur kecepatan udara yang mengalir.

g. *Timbangan digital*

Merupakan alat ukur untuk mengukur massa dari batubara.

h. *Oven Pengering*

Merupakan alat untuk mengeringkan moisture yang tersisa dari batubara setelah melewati proses dalam fluidized bed dryer.



Gambar 3.4
Thermocouple Tipe K



Gambar 3.5
Thermometer Digital



Gambar 3.6
Thermocontrol



Gambar 3.7
Water Heater



Gambar 3.8
Digital Relative Humidity



Gambar 3.9
Anemometer



Gambar 3.10
Timbangan *Digital*



Gambar 3.11
Oven Pengering

3.4 Metodologi Eksperimen

3.4.1 Tahap Persiapan

1. Mempersiapkan peralatan, pompa, blower, heater dan pemasangan alat ukur untuk temperatur inlet dan outlet.



Gambar 3.12 Peralatan *Drying Chamber*

2. Menyalakan heater, tunggu sampai temperatur aliran air mencapai temperature kerja, yaitu 40°C , setelah itu pompa dinyalakan.



Gambar 3.13 *pump, water heater and water tank*

3. Mengatur valve utama untuk pengaturan debit air (Q) sebagai fluida panas pada radiator. Serta menghidupkan kipas radiator,



Gambar 3.14 Peralatan penghasil udara pengeringan

4. Pengayakan batubara dari bongkahan besar dengan cara menggunakan saringan dengan ukuran lubang 10 mm dan 5 mm, partikel batubara yang dipakai adalah yang berukuran 6mm s/d 9mm
5. Penimbangan masa batubara, pengujian dilakukan dengan massa batu bara 600 gram,



Gambar 3.15 Batubara yang digunakan sebagai bahan yang diujikan

6. Mengatur debit udara dari blower dengan voltage regulator untuk menentukan kecepatan inlet. Kemudian tunggu selama 15 menit sampai kondisi *steady state* tercapai.



Gambar 3.16 Blower sentrifugal

3.4.2 Tahap Pengamatan

1. Menghidupkan timbangan digital dan mengatur posisi pembacaan, untuk mengetahui sample dari massa batubara yang dikeringkan.
2. Setelah kondisi *steady state* tercapai ± 15 menit, kemudian memasukkan sample ke dalam *chamber* dan lakukan percobaan, catat T_{in} , Rh_{in} , T_{out} dan Rh_{out} .



Gambar 3.17 Proses pengeringan

3. Pengambilan sample, dilakukan setiap satu menit untuk 5 menit pertama, dan 2 menit setelahnya sebanyak 3 kali, dan per 5 menit sampai pengeringan berlangsung selama 30 menit. Setiap pengambilan data berupa sample batubara, kemudian ditimbang, setiap kali pengambilan T_{DB} , dan Rh_{out} dicatat.



Gambar 3.18 *Sample*

4. Setelah pengambilan sample, kemudian dilakukan penghabisan sisa *moisture content* dari batu bara dengan cara di oven selama 1 jam menurut standart ASTM D3173.



Gambar 3.19 Proses pelepasan *moisture content* sisa pengeringan

5. Sample kemudian di timbang kembali, data yang didapatkan adalah massa kering batu bara.



Gambar 3.20 Proses Penimbangan

3.5 Tahap Analisa dan Pengolahan Data *Experimen*

Data yang didapat dari hasil pengamatan *eksperimen* diolah untuk mendapatkan nilai-nilai parameter pengeringan dari sisi batubara seperti *moisture content*, dan *drying rate*, dan karakteristik udara pengering dalam *psychrometric chart* seperti Rh_{in} , Rh_{out} , humidity ratio

3.5.1 Pengolahan Data Parameter Batubara

- Mencari Moisture Content Batubara

$$MC(0) = \frac{m_{b0} - m_{k0}}{m_{b0}} \times 100\%$$

$$MC(1) = \frac{m_{b1} - m_{k1}}{m_{b1}} \times 100\%$$

Pengolahan data dilakukan dalam waktu setiap satu menit untuk 5 menit pertama, dan 2 menit setelahnya sebanyak 3 kali, dan per 5 menit sampai pengeringan berlangsung selama 30 menit.

- Mencari Drying Rate Batubara

$$DryingRate = \frac{\Delta MC}{t}$$

$$DryingRate = \frac{MC_0 - MC_1}{t}$$

Pengolahan data *drying rate* dilakukan pada moisture content pada waktu setiap satu menit untuk 5 menit pertama, dan 2 menit setelahnya sebanyak 3 kali, dan per 5 menit sampai pengeringan berlangsung selama 30 menit.

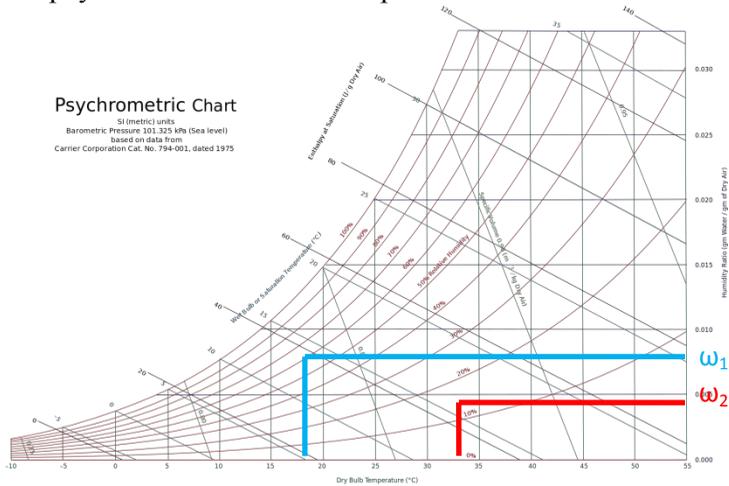
3.5.2 Pengolahan Data Parameter Udara Pengering

- Mencari Ratio Humidity

Untuk mengetahui jumlah kandungan air yang ada dalam setiap kilogram udara kering maka dilakukan pengeplotan data kedalam diagram psikometrik

Contoh perhitungan diambil pada salah satu initial kondisi percobaan ukuran partikel batubara dengan diameter 6 mm, sudut blade 10° dan beban 600 gram, data diambil pada waktu $t = 1$ menit

Didapat data berupa T outlet dan Rh outlet pada waktu tertentu, lalu T outlet dan Rh outlet diplotkan pada psychrometric chart dan didapatkan nilai ω



Pengolahan data *humidity ratio* dilakukan pada waktu setiap satu menit untuk 5 menit pertama, dan 2 menit setelahnya sebanyak 3 kali, dan per 5 menit sampai pengeringan berlangsung selama 30 menit.

- **Mencari Koefisien Perpindahan Massa**

Contoh perhitungan diambil pada salah satu initial kondisi percobaan ukuran partikel batubara dengan diameter 6 mm, sudut blade 10° dan beban 600 gram, data diambil pada waktu $t = 1$ menit

- Mencari D_{AB} (didapat dari table A-8), Binary diffusion coefficient at one atmosphere.
- Mencari ν (viscositas kinematics) didapat dari table A4, thermophysical properties of gas at atmospheric pressure.
- Mencari Schmidt number (Sc)

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

- Menghitung Reynold Number (Re)

$$Re = \frac{\bar{V}D}{\nu}$$

- Menghitung Sherwood Number (Sh)

$$Sh = 0,037 Re^{4/5} Sc^{1/3}$$

- Menghitung koefisien perpindahan massa (h_m)

$$h_m = S_h \frac{D_{AB}}{D}$$

3.6 Lembar Pengambilan Data

Pada penelitian ini pengambilan data dilakukan sesuai dengan waktu yang telah di tentukan, seperti pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Lembar pengambilan data

Time (menit)	$V_{inlet} =$					
	$T_{inlet}(^{\circ}C)$	$T_{outlet}(^{\circ}C)$	Rh_{inlet}	Rh_{outlet}	m_{basah} (gr)	m_{kering} (gr)
1						
2						
3						
4						
5						
7						
9						
11						
15						
20						
25						
30						

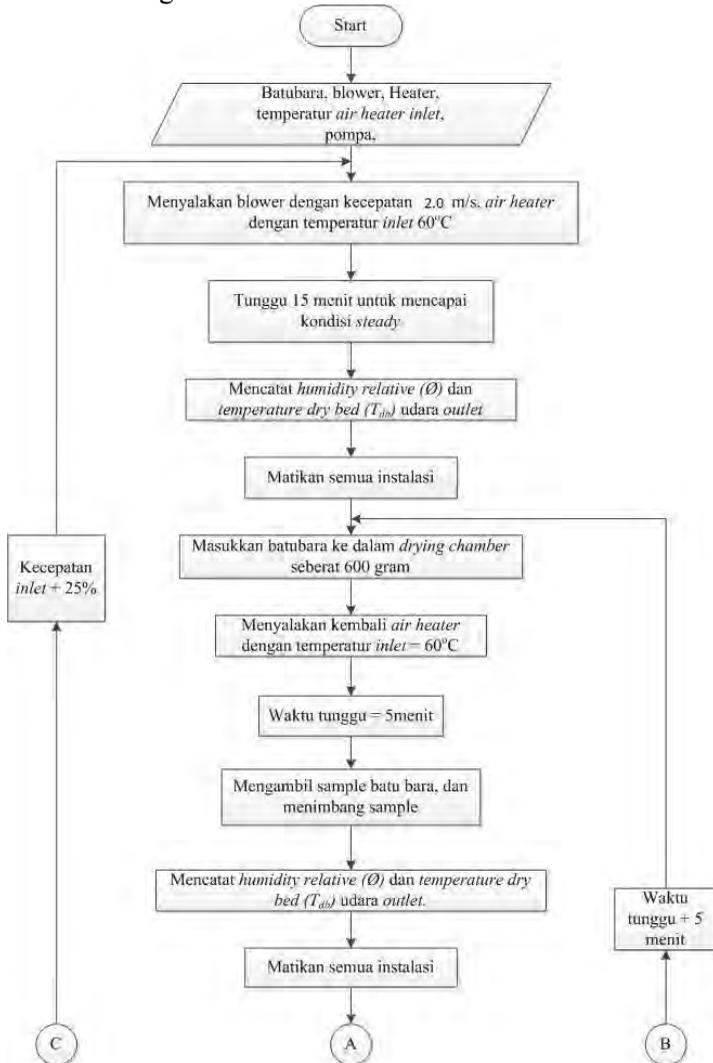
3.7 Diagram Alir Penelitian

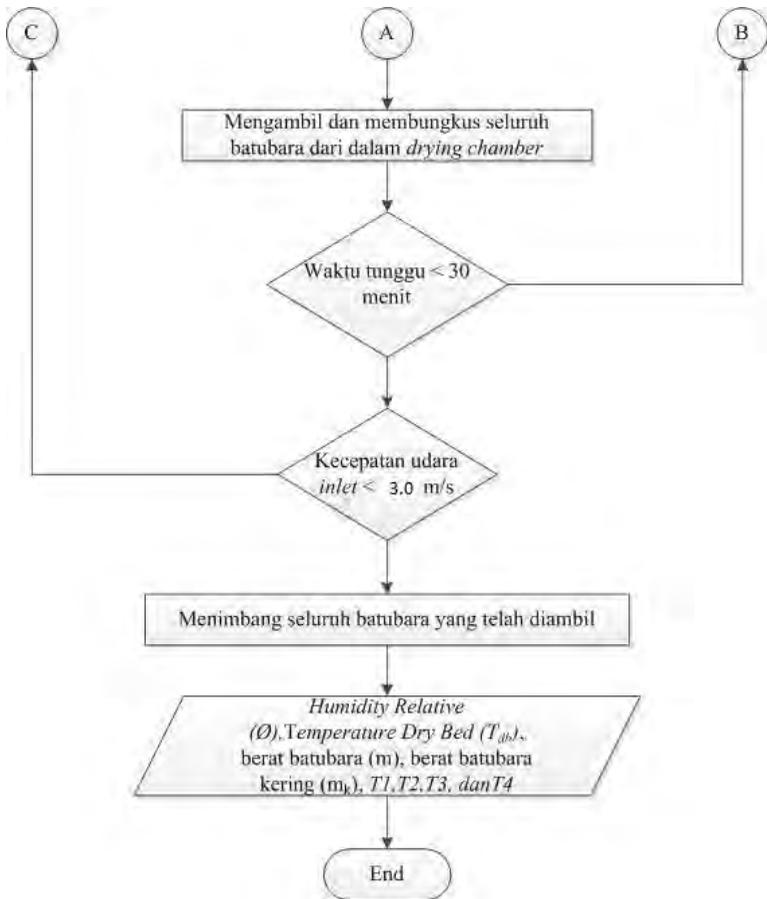
Berikut ini merupakan diagram alir pada pengujian karakteristik *swirling fluidized bed coal dryer* :



3.8 Diagram Alir Pengambilan Data

Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan berdasarkan diagram alir berikut:





BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Percobaan

Data percobaan terdapat pada lampiran yang diperoleh dari hasil pengujian alat pengering batubara dengan tipe *single row distributor* pada *swirling fluidized bed dryer* dengan variasi kecepatan inlet 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s.

4.2. Contoh Perhitungan

Dari semua data yang diperoleh selama uji eksperimen dengan variasi kecepatan inlet 2 m/s, 2.5 m/s, dan 3 m/s, digunakan contoh perhitungan dengan data yang diambil pada variasi kecepatan 3 m/s. Perhitungan data dilakukan dengan menggunakan persamaan yang sesuai dengan teori dan analogi. Berikut data yang diperoleh:

- Temperatur *inlet* (T_{in}) = 40°C
- Temperatur *outlet* (T_{out}) = 32,3°C
- *Relative humidity inlet* (RH_{in}) = 15 %
- *Relative humidity outlet* (RH_{out}) = 64,7 %
- Sudut *blade* = 10°
- Massa basah sampel batubara 0 = 2,4442 g = 0,0024442 kg
- Massa kering sampel batubara 0 = 1,6302 g = 0,0016302 kg
- Massa basah sampel batubara 1 = 3,5916 g = 0,0035916 kg
- Massa kering sampel batubara 1 = 2,6071 g = 0,0026071 kg

Data pendukung berupa properties didapatkan dari *Handbook Fundamental of Heat and Mass Transfer, P. Incropera* :

- ρ_{udara} pada temperatur 40 °C = 1.127 $\frac{kg}{m^3}$

- $\rho_{\text{batubara}} = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $\mu (T_{\text{in}}) = 190,74 \times 10^{-7} \text{ N.s/m}^2$ (Tabel A.4 Halaman A-15)
- $\mu_s (T_{\text{out}}) = 187,1 \times 10^{-7} \text{ N.s/m}^2$ (Tabel A.4 Halaman A-15)
- *Prandtl Number* = 0,705 (Tabel A.4 Halaman A-15)
- *Thermal Conductivity* udara (k_{udara}) = $27.262 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
- *Spesific Heat* batubara (c_p) = $1260 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- Diffusion Coefficient H₂O (D_{AB}) = $0.000026 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- $\nu (T_{\text{in}}) = 17,198 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$ (Tabel A.4 Halaman A-15)
- $D_{\text{AB}} = 24,424 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $k \text{ udara} = 27,3 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$
- $C_p \text{ udara} = 1,008 \text{ kJ/kg.K}$

4.2.1 Menghitung Kecepatan Fluidisasi Udara

Percobaan ini menggunakan batubara dengan diameter rata-rata 6 mm (0,006 m). Untuk dapat menentukan besarnya kecepatan udara pengering didasarkan pada kondisi fluidisasi minimum, dimana keadaan batubara pada posisi mengambang. Perhitungan kecepatan untuk fluidisasi batubara didapatkan dari perhitungan dengan persamaan 2.1 sebagai berikut:

Pada percobaan ini menggunakan udara pengering dengan temperatur 40°C. Koefisien drag force (C_d) = 0.47 (batubara dianggap bola).

$$V = \sqrt{\frac{2 \times 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{4}{3} \pi (3 \times 10^{-3})^3 \text{m}^3 \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0.47 \times 1.114 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\pi}{4} (6 \times 10^{-3})^2}} \sin 10$$

$$V = 2 \text{ m/s}$$

4.2.2 Menghitung Debit Udara (Q)

Dalam perhitungan debit udara menggunakan kecepatan udara keluar blade dan luas permukaan blade dengan diameter lingkaran besar 180 mm dan diameter lingkaran kecil 90 mm.

$$\begin{aligned}
 Q &= v \cdot A_{blade} \\
 &= 3 \frac{m}{s} \times ((\pi \times 0.090 \times 0.090) - (\pi \times 0,055 \times 0,055))m^2 \\
 &= 0.04781 \frac{m^3}{s}
 \end{aligned}$$

4.2.3 Menghitung Moisture Content

Contoh perhitungan diambil pada kecepatan 3 m/s, ukuran partikel 6 mm, sudut *blade* 10° dan beban 600 gram pada waktu t = 1 menit.

$$MC 0 = \frac{ms_{c,basa\ h} - ms_{c,kering}}{m_{c,basa\ h}} \times 100\%$$

$$MC 0 = \frac{2,4442\ g - 1,6302\ g}{2,4442\ kg} \times 100\%$$

$$MC 0 = 33,303\ \%$$

$$MC 1 = \frac{ms_{c,basa\ h} - ms_{c,kering}}{m_{c,basa\ h}} \times 100\%$$

$$MC 1 = \frac{3,5916\ g - 2,6071\ g}{3,5916\ kg} \times 100\%$$

$$MC 1 = 27,411\ \%$$

4.2.4 Menghitung Drying Rate

Contoh perhitungan diambil pada kecepatan 3 m/s, ukuran partikel 6 mm, sudut *blade* 10° dan beban 600 gram pada waktu t = 1 menit. Dengan *moisture content* sebagai berikut:

$$MC 0 = 33,303\ \%$$

$$MC 1 = 27,411\ \%$$

$$Drying\ Rate = \frac{MC\ 0 - MC\ 1}{t_1 - t_0}$$

$$Drying\ Rate = \frac{33,303 - 27,411}{1} = 5,8916\ \%/menit$$

4.2.5 Menghitung *Humidity Ratio*

Untuk mengetahui perubahan *humidity ratio* yang terjadi pada udara pengering maka dapat diambil contoh untuk laju perpindahan massa dengan kecepatan 3m/s pada 1 menit pertama. Pada proses ini udara pengering mengalami proses *cooling* dan *humidifying* dimana terjadi penurunan temperatur udara pengering dan peningkatan kelembaban udara. Temperatur udara pengering sebelum melewati permukaan batubara sebesar 40 °C dengan nilai *relative humidity* sebesar 15 % didapatkan bahwa nilai *humidity ratio* untuk udara pada saat inlet adalah sebesar 6,901 g/kg udara kering. Setelah melewati permukaan batubara *temperatur* udara pengering turun menjadi 32,3 °C dengan nilai *relative humidity* meningkat menjadi 64,7 %. Didapatkan nilai *humidity ratio* udara pengering meningkat menjadi 19,916 g/kg udara kering. Dari data yang ada maka besarnya massa uap air yang diterima oleh udara pengering dapat dihitung sebagai berikut:

Selisih *humidity ratio* dari udara pengering tersebut adalah:

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \omega_{outlet} - \omega_{inlet} \\ &= (19,916 - 6,901) \frac{\text{g}}{\text{kg}_{\text{udara kering}}} \\ &= 13,0150 \frac{\text{g}}{\text{kg}_{\text{udara kering}}}\end{aligned}$$

4.2.6 Menghitung Koefisien Perpindahan Panas dan Massa Secara Konveksi

Contoh perhitungan diambil pada kecepatan 3 m/s, ukuran partikel 6 mm, sudut *blade* 10° dan beban 600 gram pada waktu t = 1 menit. Berikut data:

a. Menghitung Reynold Number (Re_D)

$$\begin{aligned}Re_D &= \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \\ Re_D &= \frac{1,127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,006 \text{ m}}{190,74 \times 10^{-7} \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}} = 1063,54\end{aligned}$$

b. Menghitung Nusselt Number (Nu_D)

Menentukan persamaan Nusselt menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Nu = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$Nu = 2 + 0,6 \times 1063,54^{1/2} \times 0,705^{1/3}$$

$$Nu = 2 + 19,57 \times 0,89$$

$$Nu = 19,42$$

c. Nilai Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (h)

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

$$h = 61,48 \times \frac{27,3 \times 10^{-3}}{0,07}$$

$$h = 23,97$$

d. Menghitung Schmidt Number (Sc)

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

$$Sc = \frac{17,198 \times 10^{-6}}{24,424 \times 10^{-6}}$$

$$Sc = 0,704$$

e. Menghitung Sherwood Number (sh)

$$Sh = 2 + 0,6 Re_D^{1/2} \cdot Sc^{1/3}$$

$$Sh = 0.037 \times 1063,54^{1/2} \times 0.704^{1/3}$$

$$Sh = 19,41$$

f. Nilai Koefisien Perpindahan Massa Konveksi (h_m)

$$h_m = Sh \cdot \left(\frac{D_{AB}}{D} \right)$$

$$h_m = 19,41 \cdot \left(\frac{24,424 \times 10^{-6}}{0,006} \right)$$

$$h_m = 0,079$$

4.3 Analisa dan Pembahasan Hasil Eksperimen

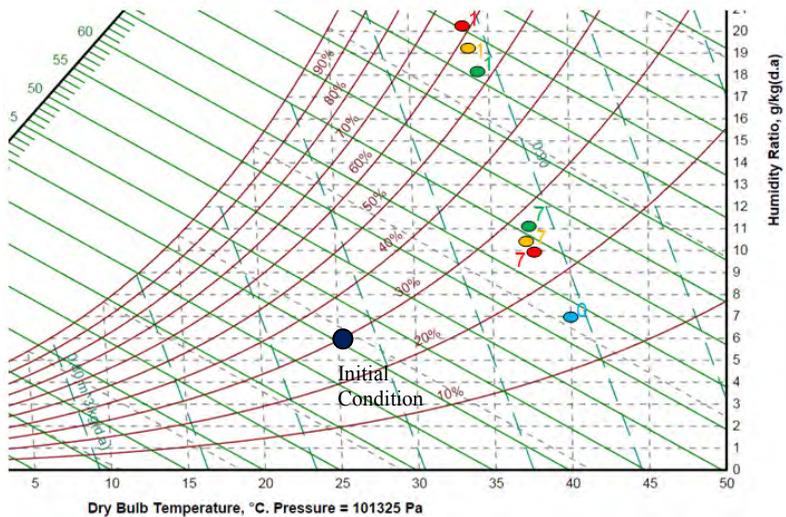
4.3.1 Analisa Udara Pengering dengan *Psychrometric Chart*

Hubungan antara temperatur dan relative humidity udara pengering dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik campuran uap air pada udara. Untuk mengetahui properties campuran antara uap air dan udara dapat dilihat pada psychrometric chart. Dari psychrometric chart ini akan dapat diketahui beberapa parameter yang terkait dengan udara pengering seperti humidity ratio. Humidity ratio merupakan perbandingan antara massa uap air dengan massa udara pengering. Besarnya perbedaan humidity ratio pada udara pengering masuk chamber dengan humidity ratio pada keluar chamber menandakan banyaknya uap air yang terserap oleh udara. Dilihat dari grafik relative humidity pada lima menit pertama merupakan laju kritis pelepasan uap air oleh batubara. Hal ini ditandai dengan penurunan temperatur udara dan kenaikan relative humidity paling besar dari udara pengering yang keluar chamber. Dari hasil percobaan didapat nilai relative humidity dan temperatur seperti pada tabel berikut ini :

Tabel 4.1 Data temperatur dan relative humidity udara keluar chamber

Waktu	3 m/s		2,5 m/s		2 m/s	
	T_{DB}	RH	T_{DB}	RH	T_{DB}	RH
0	40,0	15,0	40,0	15,0	40,0	15,0
1	33,5	62,5	33,9	59,0	34,3	53,8
2	34,6	52,2	35,0	49,2	35,2	47,5
3	35,2	45,4	35,8	43,4	36,3	38,6
4	36,0	39,0	36,3	37,8	36,7	35,4
5	36,4	31,8	36,7	34,5	36,9	33,4
7	37,5	26,2	37,1	27,0	37,3	28,6
9	37,9	24,0	37,6	26,1	37,4	26,7
11	38,3	21,7	38,1	23,1	37,7	23,5
16	38,9	21,1	38,7	22,0	38,1	22,2
21	39,3	20,6	39,1	21,5	38,5	21,6
25	39,6	20,2	39,5	20,7	39,0	20,9
31	39,8	20,0	39,6	20,3	39,3	20,4

Dari data temperatur dan relative humidity akan diketahui humidity ratio dengan cara plotting pada psychrometric chart. Humidity ratio merupakan perbandingan massa uap air yang terkandung pada udara setiap kilogram udara. Semakin besar nilai humidity ratio udara maka uap air yang terkandung dalam udara juga semakin besar. Dengan mengetahui nilai humidity ratio maka akan dapat diketahui besarnya perpindahan massa uap air yang terserap oleh udara.



● 2 m/s

● 2,5 m/s

● 3 m/s

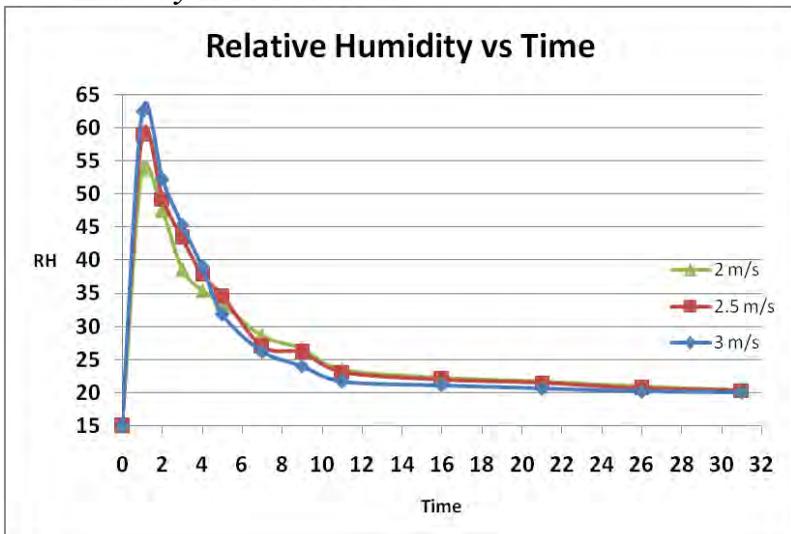
Gambar 4.1 Pengaruh kecepatan terhadap udara pengering dalam psychrometric chart

Berdasarkan nilai temperatur dan relative humidity yang diperoleh dari hasil eksperimen (Tabel 4.1) diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan udara pengering maka nilai relative humidity pada udara keluar akan semakin tinggi. Proses yang

terjadi dalam psychrometric chart dengan variasi kecepatan 3 m/s, 2,5 m/s, dan 2 m/s antara lain:

1. Proses pertama : Proses pengeringan (cooling dan humidifying) dimana terjadi penyerapan moisture content batubara yang diikuti dengan naiknya nilai humidity ratio dan turunnya temperatur udara pengering, perpindahan massa air dari batubara ke udara pengering terjadi akibat kandungan uap air pada udara pengering lebih kecil dibandingkan batubara. (Titik 0-1)
2. Proses kedua : Proses (Heating dan demihumidifying) dimana terjadi peningkatan temperatur udara keluar chamber dengan diikuti menurunnya nilai humidity ratio dalam udara pengering. Hal ini disebabkan semakin berkurangnya moisture content yang terkandung didalam batu bara. (Titik 1-5).

4.3.2 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap *Relative Humidity* Keluar Chamber



Gambar 4.2 Pengaruh kecepatan terhadap *relative humidity* keluar chamber

Relative humidity adalah perbandingan antara jumlah uap air yang ada di dalam udara dengan jumlah uap air maksimum pada suhu tertentu. Pada gambar 4.2 menunjukkan besarnya nilai relative humidity pada udara pengering keluaran chamber (chamber out) dengan kecepatan inlet 3 m/s, 2,5 m/s, dan 2 m/s. Perubahan nilai relative humidity dengan kecepatan 3 m/s dari 62,5 % menjadi 20,0 %, kecepatan 2,5 m/s dari 59 % menjadi 20,3 %, dan kecepatan 2 m/s dari 53,82% menjadi 20,4 %. Nilai relative humidity tiap variasi kecepatan cenderung mendekati relative humidity awal dari udara pengering.

Perbedaan nilai relative humidity tersebut menandakan perbedaan massa air yang ada di udara pengering setelah keluar chamber. Terjadinya penurunan relative humidity pada tiap menitnya disebabkan moisture content batubara semakin rendah sehingga uap air yang terlepas dari batubara menuju udara pengering semakin rendah. Kecepatan semakin tinggi memiliki nilai Rh yang tinggi pula hal itu dikarenakan kecepatan mempengaruhi nilai Reynold

$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$, semakin tinggi nilai Re maka nilai Sherwood Number

akan semakin tinggi, $Sh = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}$. Semakin tinggi nilai Sherwood Number maka nilai koefisien perpindahan massa akan

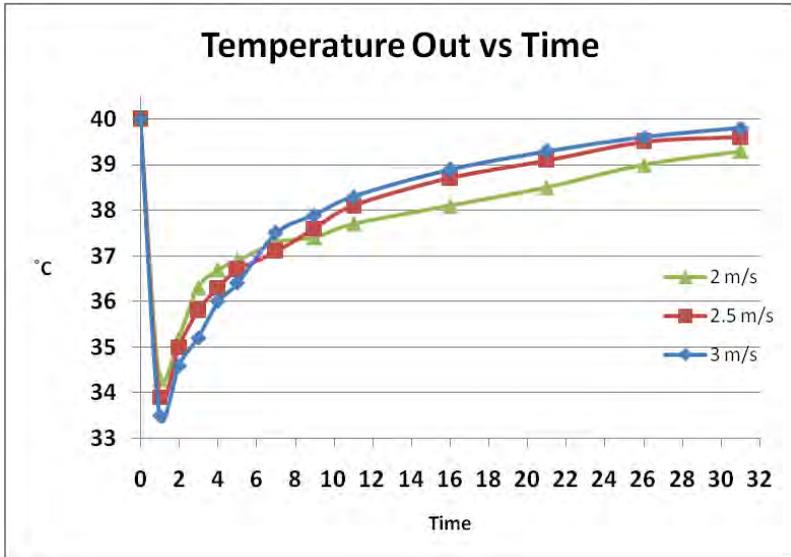
semakin tinggi $h_m = Sh \frac{D_{AB}}{D}$ sehingga nilai laju perpindahan

massa akan besar $n_A = h_m \cdot A \cdot (C_{A,s} - C_{A,\infty})$.

Dari grafik diatas juga dapat dilihat bahwa untuk kecepatan 3 m/s pada menit ke 5 nilai Rh akan *crossing* dengan Rh 2,5 dan 2 m/s dan untuk kecepatan 2,5 m/s pada menit ke 7 nilai Rh akan *crossing* dengan dan 2 m/s. Hal ini terjadi karena pada menit-menit awal terjadi laju pengeringan yang naik yang relatif tinggi sehingga pada suatu waktu laju perpindahan massa dari kecepatan yang lebih

tinggi akan menjadi lebih kecil karena terjadi laju pengeringan menurun yang lebih awal daripada kecepatan rendah.

4.3.3 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap *Temperature* Keluar *Chamber*



Gambar 4.3 Pengaruh kecepatan terhadap temperatur udara keluar *chamber*

Pada gambar 4.3 dapat diamati bahwa untuk ketiga variasi kecepatan memiliki kenaikan trendline dengan nilai temperatur outlet chamber lebih rendah dari temperatur inlet chamber. Pada menit 1 untuk kecepatan 3 m/s memiliki nilai temperatur sebesar 33,5 °C, kecepatan 2,5 m/s sebesar 33,9 °C, dan kecepatan 2 m/s sebesar 34,3 °C. Tinggi rendahnya temperatur keluaran dari chamber dipengaruhi oleh moisture content pada batubara.

Penurunan temperatur pada udara pengering dikarenakan adanya transfer panas dari udara pengering dengan permukaan batubara. Pada saat awal pengeringan kalor yang diterima oleh batubara cukup besar karena perbedaan temperatur permukaan batubara dengan udara pengering cukup besar. Kalor yang diterima oleh

batubara kemudian akan disimpan pada batubara yang menyebabkan temperatur permukaan batubara menjadi meningkat. Karena temperatur permukaan meningkat menyebabkan selisih temperatur antara permukaan batubara dengan udara pengering menjadi lebih kecil. Semakin kecil perbedaan temperatur antara permukaan batubara dengan udara pengering menyebabkan kalor yang ditransfer dari udara pengering ke permukaan batubara menjadi lebih kecil. Hal inilah yang menyebabkan temperatur outlet udara pengering pada awal pengeringan menjadi lebih rendah dan meningkat seiring waktu pengeringan.

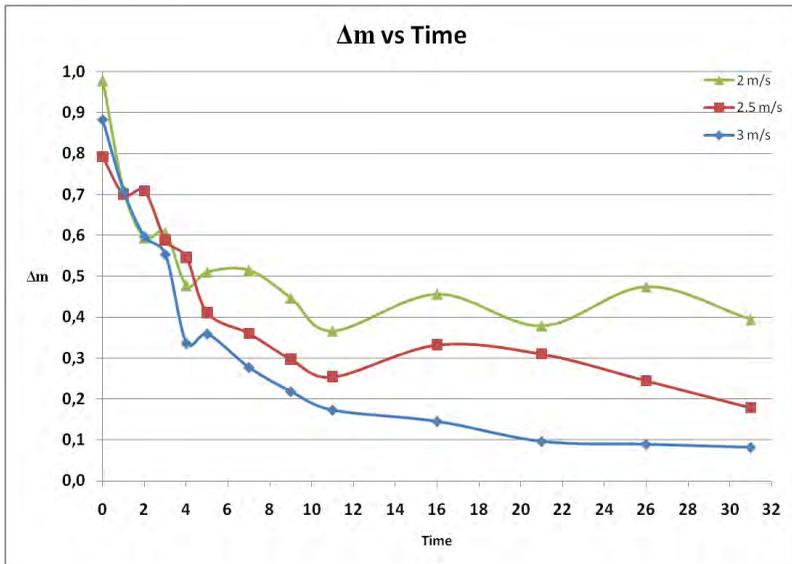
Kecepatan 3 m/s memiliki nilai temperatur outlet yang paling rendah pada awal pengeringan tetapi memiliki kenaikan paling tinggi di akhir pengeringan, hal ini dikarenakan nilai kecepatan tinggi akan mempengaruhi nilai Reynold yang semakin tinggi pula,

$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$. Dengan nilai Reynold yang semakin tinggi maka nilai Nusselt Number akan semakin tinggi pula,

$Nu = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}$. Dengan nilai Nusselt yang semakin tinggi akan menyebabkan nilai koefisien perpindahan panas akan

semakin tinggi $h = \frac{Nu.k}{D}$ sehingga nilai temperatur akan meningkat pula sesuai dengan rumusan $q = h.A.(T_s - T_{inf})$.

4.3.4 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Δ Massa Batubara



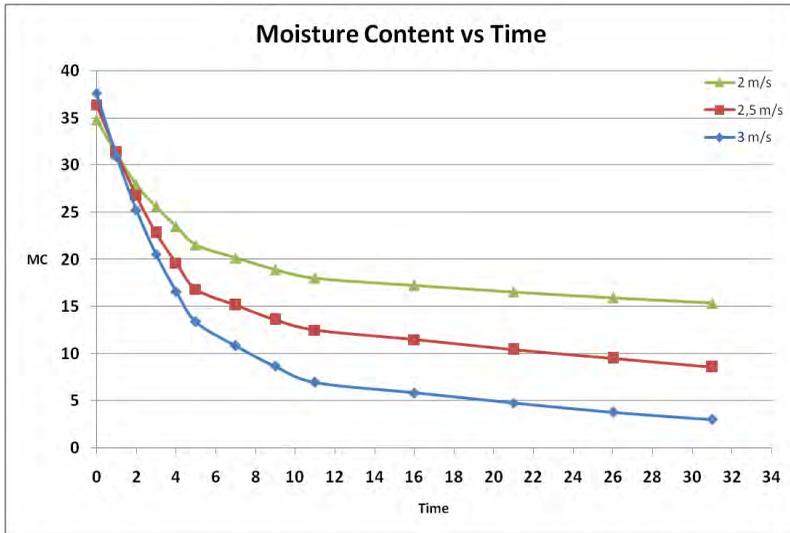
Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan terhadap selisih massa batubara (Δm)

Proses pengeringan merupakan proses penyerapan atau perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering. Gambar 4.4 menunjukkan massa uap air yang berpindah dari batubara ke udara dengan variasi kecepatan. Dimana pada kecepatan 3 m/s mampu memindahkan air dari batubara dari 0,8826 gram mengecil menjadi 0,0820 gram. Kecepatan 2,5 m/s mampu memindahkan air dari batubara dari 0,7918 gram menjadi 0,1788 gram, dan kecepatan 2 m/s mampu memindahkan air dari batubara dari 0,9789 gram menjadi 0,3944 gram.

Gambar diatas sesuai dengan teori dimana semakin tinggi kecepatan (v) maka Bilangan Reynold (Re) semakin tinggi dengan nilai Reynold semakin tinggi, maka nilai koefisien perpindahan massa (h_m) akan semakin tinggi pula, sehingga akan menyebabkan perpindahan massa yang lebih besar pada kecepatan yang lebih tinggi, pengurangan massa air dari batubara tiap waktu terjadi

karena kandungan air yang berada dalam batubara akan berkurang fungsi waktu, sehingga kemampuan udara pengering untuk menyerap air dari batubara akan berkurang dan selisih massa (Δm) akan mengecil.

4.3.5 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap *Moisture Content* Batubara



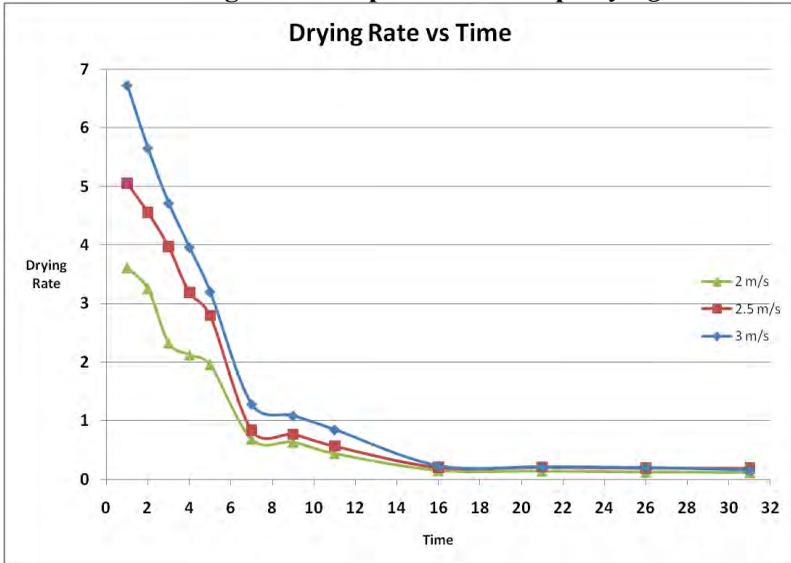
Gambar 4.5 Pengaruh kecepatan terhadap *moisture content*

Proses pengeringan merupakan proses penyerapan atau perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering. Gambar 4.5 menunjukkan kemampuan untuk mengeringkan batubara dengan variasi kecepatan. Dimana pada kecepatan 3 m/s mampu mengeringkan batubara dari moisture content 33,650 % menjadi 3,025 %. Kecepatan 2,5 m/s mampu mengeringkan batubara dari moisture content 36,383 % menjadi 8,569 %. Dan kecepatan 2 m/s mampu mengeringkan batubara dari moisture content 34,804 % menjadi 15,357 %.

Gambar diatas sesuai dengan teori dimana semakin tinggi kecepatan (v) maka Bilangan Reynold (Re) semakin tinggi dengan nilai Reynold semakin tinggi, berarti suatu aliran itu semakin

turbulen, apabila aliran itu semakin turbulen maka perpindahan massa yang terjadi semakin tinggi, sehingga moisture content pada batubara akan semakin berkurang terlepas ke udara.

4.3.6 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap *Drying Rate*



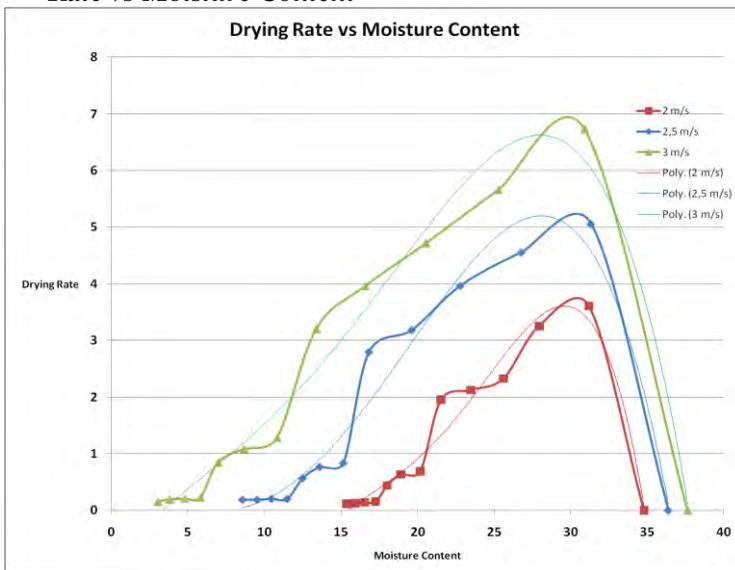
Gambar 4.6 Pengaruh kecepatan terhadap *drying rate*

Grafik drying rate merupakan grafik moisture content fungsi waktu, dimana pada grafik ini menunjukkan perubahan moisture pada batubara tiap waktu tertentu. Pada grafik 4.6 diatas menunjukkan grafik drying rate untuk ketiga variasi kecepatan yaitu 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3 m/s. Trend grafik diatas memperlihatkan terjadi penurunan yang signifikan pada perubahan moisture content pada batubara terhadap waktu pengeringan. Pada grafik dengan kecepatan 3 m/s memiliki drying rate paling besar dengan nilai 6,7295 %/menit, diikuti dengan kecepatan 2,5 m/s dengan nilai 5,0549 %/menit dan 2 m/s dengan nilai 3,6099 %/menit. Pada tujuh menit pertama untuk masing-masing variasi kecepatan memperlihatkan drying rate yang signifikan, tetapi setelah menit sebelas perubahan drying rate cenderung konstan.

Perbedaan laju drying rate dengan variasi kecepatan disebabkan karena perbedaan antara laju perpindahan massa yang terjadi pada batubara. Kecepatan yang lebih tinggi akan memiliki laju perpindahan massa yang lebih besar sehingga akan mempunyai drying rate yang besar pula. Sementara untuk penurunan drying rate disebabkan oleh moisture yang tersisa di batubara tersisa hanya moisture terikat sehingga laju pengeringan batubara menjadi lebih kecil.

Grafik drying rate pada eksperimen ini diperoleh dari data perbandingan antara sampel basah dan sampel kering yang telah dikeringkan melalui oven. Sehingga grafik yang diperoleh merupakan data hasil penimbangan. Grafik ini bertujuan untuk mengetahui besarnya massa uap air yang dilepaskan dari permukaan batubara tiap satuan waktu.

4.3.7 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Grafik *Drying Rate vs Moisture Content*



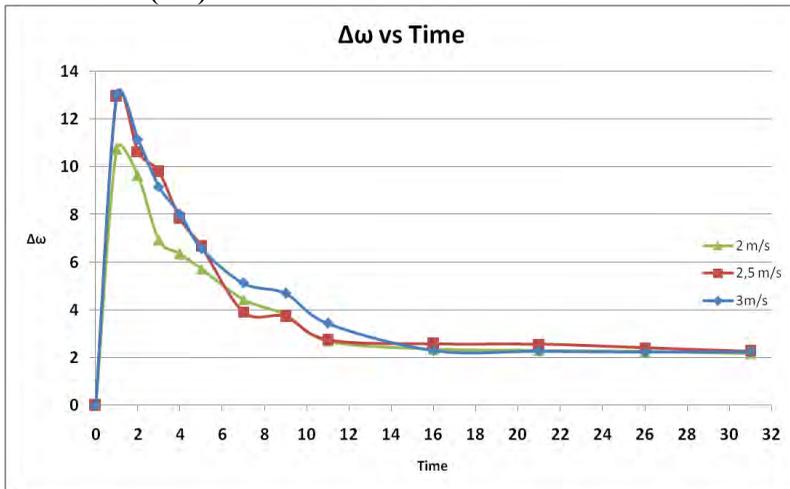
Gambar 4.7 Pengaruh kecepatan terhadap *drying rate vs moisture content*

Grafik drying rate vs moisture content merupakan grafik moisture content fungsi drying rate, dimana pada grafik ini membandingkan perubahan moisture pada batubara dengan drying rate yang terjadi pada suatu kondisi waktu tertentu. Pada grafik 4.7 diatas menunjukkan grafik drying rate vs moisture content untuk ketiga variasi kecepatan yaitu 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3 m/s. Trend grafik diatas memperlihatkan terjadi kenaikan drying rate yang signifikan dengan bertambahnya kecepatan dan perubahan moisture content akhir pada batubara yang signifikan terhadap perubahan kecepatan. Pada grafik dengan kecepatan 3 m/s memiliki drying rate paling besar dengan nilai 6,7295 %/menit, diikuti dengan kecepatan 2,5 m/s dengan nilai 5,0549 %/menit dan 2 m/s dengan nilai 3,6099 %/menit. Moisture content akhir pada kecepatan 3 m/s adalah 3,025%, kecepatan 2,5 m/s memiliki moisture content akhir 8,569%, dan kecepatan 2 m/s memiliki moisture content akhir 15,357%. Pada batubara dengan kondisi moisture content diatas 30% memiliki nilai kenaikan drying rate yang paling tinggi, dan setelah moisture content dibawah 30% terjadi penurunan nilai drying rate hingga akhirnya cenderung konstan ketika mencapai moisture content dibawah 20%.

Perbedaan laju drying rate dan moisture content dengan variasi kecepatan disebabkan karena perbedaan antara laju perpindahan massa yang terjadi pada batubara. Kecepatan yang lebih tinggi akan memiliki laju perpindahan massa yang lebih besar sehingga akan mempunyai drying rate yang besar pula. Sementara untuk penurunan drying rate disebabkan oleh moisture yang tersisa di batubara tersisa hanya moisture terikat sehingga laju pengeringan batubara menjadi lebih kecil.

Grafik drying rate vs moisture content pada eksperimen ini diperoleh dari data perbandingan antara sampel basah dan sampel kering yang telah dikeringkan melalui oven. Sehingga grafik yang diperoleh merupakan data hasil penimbangan. Grafik ini bertujuan untuk mengetahui besarnya massa uap air yang dilepaskan dari permukaan batubara tiap satuan waktu disertai dengan laju pengeringan yang terjadi tiap satuan waktu.

4.3.8 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Selisih *Humidity Ratio* ($\Delta\omega$)



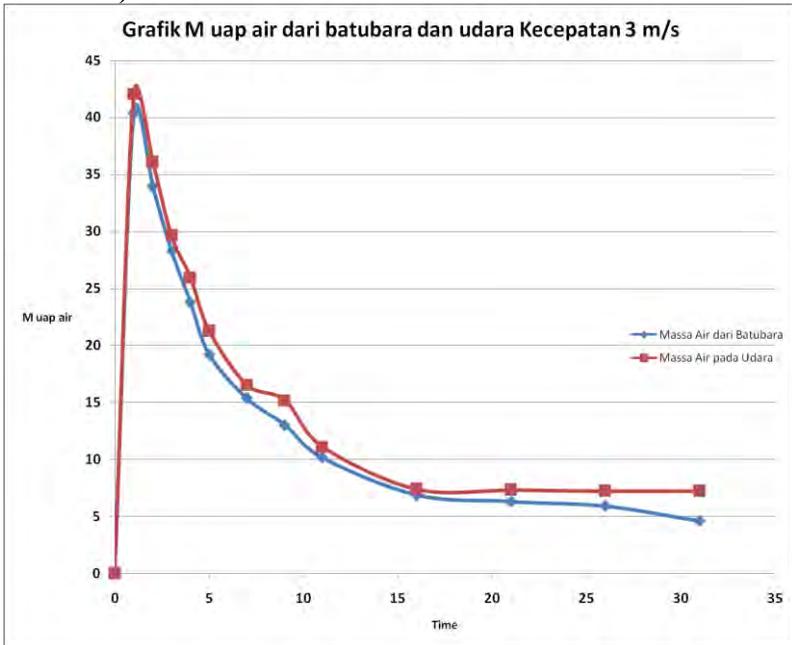
Gambar 4.8 Pengaruh kecepatan terhadap selisih *humidity ratio* ($\Delta\omega$)

Humidity ratio adalah massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Pada gambar 4.8 menunjukkan besarnya nilai selisih humidity ratio ($\Delta\omega$) antara humidity ratio tiap waktu dengan humidity ratio udara pengering. Pada gambar dapat dilihat nilai $\Delta\omega$ memiliki trendline menurun di tiap variasi kecepatan. Nilai $\Delta\omega$ pada kecepatan 3m/s memiliki nilai yang lebih tinggi daripada variasi kecepatan lainnya, tetapi pada menit 16 terjadi *crossing* dengan kecepatan yang lebih rendah, hal ini menunjukkan bahwa kadar uap air yang diterima udara jauh lebih sedikit daripada waktu sebelumnya. Pada menit 1 kecepatan 3 m/s, nilai $\Delta\omega$ sebesar 13,0150 gr/kg udara kering. Untuk kecepatan 2,5 m/s nilai $\Delta\omega$ sebesar 12,9640 gr/kg udara kering dan untuk kecepatan 2 m/s nilai $\Delta\omega$ sebesar 10,7520 gr/kg udara kering.

Pada 7 menit pertama mengalami penurunan $\Delta\omega$ yang signifikan. Hal ini menandakan proses pengeringan secara maksimal terjadi pada menit tersebut. Karena massa air yang ada di udara memiliki nilai tertinggi. Pada menit tersebut, moisture

content pada batubara mengalami penurunan yang besar. Setelah menit tersebut penurunan $\Delta\omega$ cenderung kecil karena moisture content yang tersisa pada batubara makin kecil.

4.3.9 Analisa Perbandingan Massa Uap Air dari Batubara dengan Kandungan Uap Air pada Udara (Kecepatan 3 m/s)



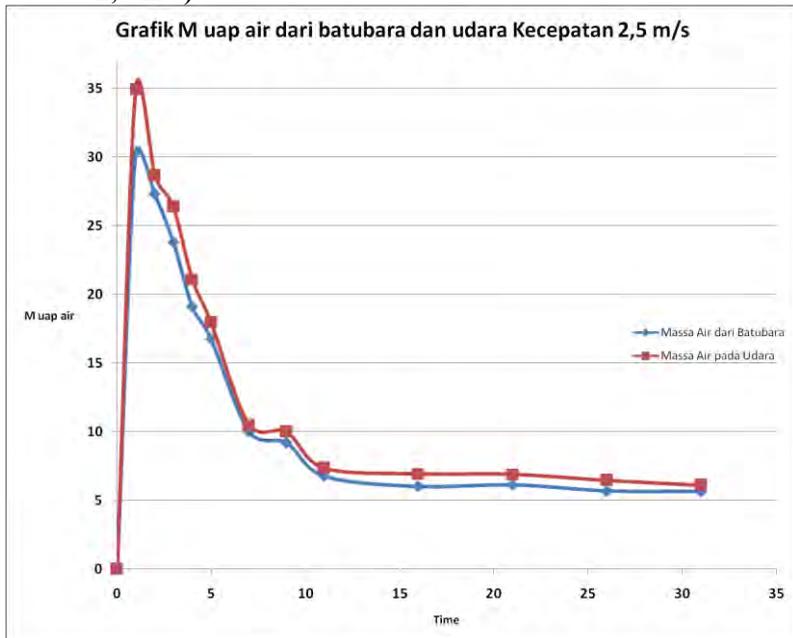
Gambar 4.9 Perbandingan massa uap air dengan kecepatan 3 m/s

Gambar 4.9 merupakan perbandingan massa uap air yang dilepas batubara dengan kandungan uap air yang diterima udara. Pada gambar dapat dilihat massa uap air memiliki trendline menurun. Hal ini menandakan bahwa telah terjadi proses perpindahan massa dari batubara ke udara pengering sehingga moisture content yang ada di batubara berkurang pada tiap menit. Massa uap air yang keluar dari batubara didapatkan dari selisih moisture content dari batubara tiap menitnya. Sedangkan

kandungan uap air udara didapatkan dari selisih humidity ratio tiap menitnya. Pada menit 1 nilai massa uap air dari batubara sebesar 40,3773 gr dan nilai kandungan uap air yang diterima udara sebesar 42,0733 gr. Pada menit 31 nilai massa uap air dari batubara sebesar 4,5964 gr dan nilai kandungan uap air yang diterima udara sebesar 7,2250 gr.

Dari trendline di atas dapat dilihat perpindahan massa yang relatif tinggi terjadi pada 7 menit awal proses pengeringan, dan bisa dikatakan sebagai laju pengeringan naik. Berdasarkan teori dapat dikatakan bahwa massa uap air dari batubara harus sebanding atau sama dengan kandungan uap air yang diterima udara.

4.3.10 Analisa Perbandingan Massa Uap Air dari Batubara dengan Kandungan Uap Air pada Udara (Kecepatan 2,5 m/s)

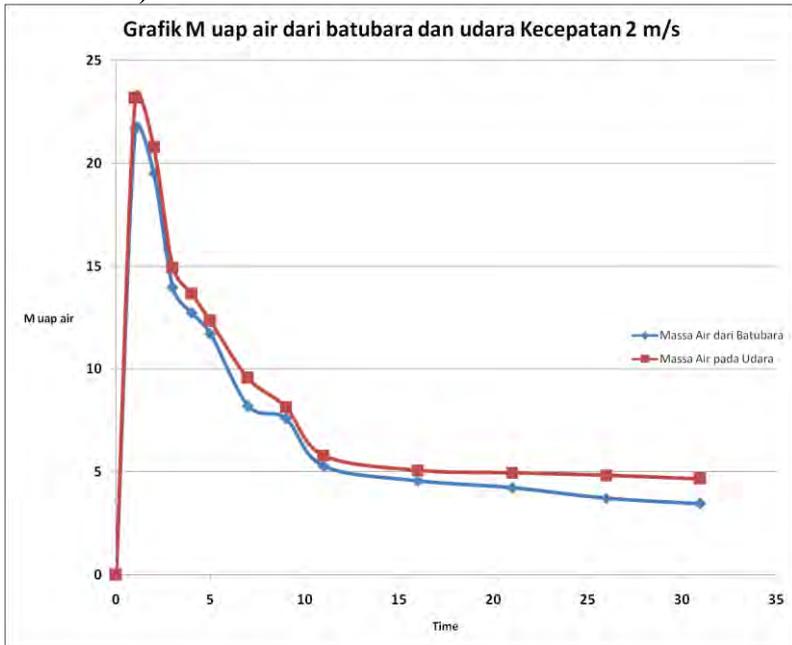


Gambar 4.10 Perbandingan massa uap air dengan kecepatan 2,5 m/s

Gambar 4.10 merupakan perbandingan massa uap air yang dilepas batubara dengan kandungan uap air yang diterima udara. Pada gambar dapat dilihat massa uap air memiliki trendline menurun. Hal ini menandakan bahwa telah terjadi proses perpindahan massa dari batubara ke udara pengering sehingga moisture content yang ada di batubara berkurang pada tiap menit. Massa uap air yang keluar dari batubara didapatkan dari selisih moisture content dari batubara tiap menitnya. Sedangkan kandungan uap air udara didapatkan dari selisih humidity ratio tiap menitnya. Pada menit 1 nilai massa uap air dari batubara sebesar 30,3291 gr dan nilai kandungan uap air yang diterima udara sebesar 34,9237 gr. Pada menit 31 nilai massa uap air dari batubara sebesar 5,6556 gr dan nilai kandungan uap air yang diterima udara sebesar 6,1259 gr.

Dari trendline di atas dapat dilihat perpindahan massa yang relatif tinggi terjadi pada 7 menit awal proses pengeringan, dan bisa dikatakan sebagai laju pengeringan naik. Berdasarkan teori dapat dikatakan bahwa massa uap air dari batubara harus sebanding atau sama dengan kandungan uap air yang diterima udara.

4.3.11 Analisa Perbandingan Massa Uap Air dari Batubara dengan Kandungan Uap Air pada Udara (Kecepatan 2 m/s)



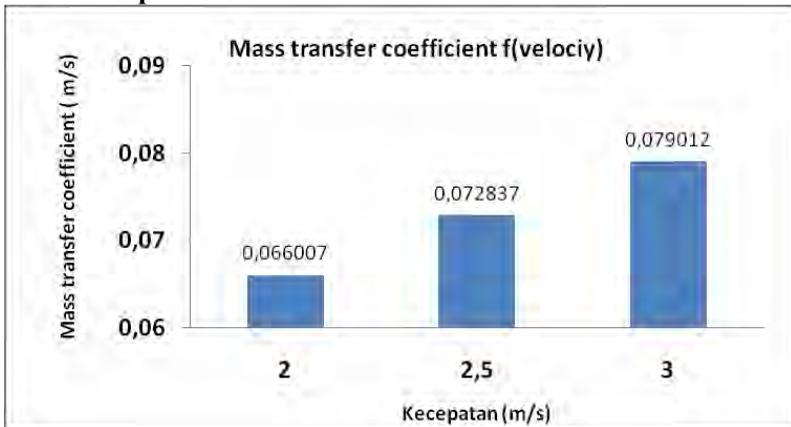
Gambar 4.11 Perbandingan massa uap air dengan kecepatan 2 m/s

Gambar 4.11 merupakan perbandingan massa uap air yang dilepas batubara dengan kandungan uap air yang diterima udara. Pada gambar dapat dilihat massa uap air memiliki trendline menurun. Hal ini menandakan bahwa telah terjadi proses perpindahan massa dari batubara ke udara pengering sehingga moisture content yang ada di batubara berkurang pada tiap menit. Massa uap air yang keluar dari batubara didapatkan dari selisih moisture content dari batubara tiap menitnya. Sedangkan kandungan uap air udara didapatkan dari selisih humidity ratio tiap menitnya. Pada menit 1 nilai massa uap air dari batubara sebesar 21,6594 gr dan nilai kandungan uap air yang diterima udara sebesar 23,1718 gr. Pada menit 31 nilai massa uap air dari batubara sebesar

3,4657 gr dan nilai kandungan uap air yang diterima udara sebesar 4,6788 gr.

Dari trendline di atas dapat dilihat perpindahan massa yang relatif tinggi terjadi pada 7 menit awal proses pengeringan, dan bisa dikatakan sebagai laju pengeringan naik. Berdasarkan teori dapat dikatakan bahwa massa uap air dari batubara harus sebanding atau sama dengan kandungan uap air yang diterima udara.

4.3.12 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa



Gambar 4.12 Pengaruh kecepatan terhadap koefisien perpindahan massa

Pada gambar 4.12 menunjukkan koefisien perpindahan massa tiap variasi kecepatan, trendline dari gambar di atas terlihat menurun seiring dengan penurunan nilai kecepatan inlet. Nilai koefisien perpindahan massa pada kecepatan 3 m/s sebesar 0,079012 m/s, kecepatan 2,5 m/s sebesar 0,072837 m/s dan kecepatan 2 m/s sebesar 0,066007 m/s.

Kecepatan mempengaruhi langsung terhadap Reynold Number, semakin tinggi Reynolds Number maka nilai Sherwood Number (Sh) semakin tinggi. Nilai Sherwood Number semakin naik maka koefisien perpindahan massa secara konveksi semakin naik pula.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dengan kajian pustaka dari beberapa buku dan penelitian sebelumnya, juga setelah dilakukan eksperimen terhadap *swirling fluidized bed coal dryer* dan diakhiri dengan melakukan analisa grafik dari data hasil pengujian, penulis memberikan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan yang dapat disampaikan pada tugas akhir ini antara lain adalah :

1. Dari ketiga variasi kecepatan, kecepatan 3 m/s memiliki hasil temperatur keluar *chamber* paling rendah di awal pengeringan dengan nilai pada menit 1 sebesar 33,5 °C dan *relative humidity* tertinggi dengan nilai 62,5 %, tetapi memiliki temperatur keluar *chamber* paling tinggi di akhir pengeringan dengan nilai pada menit 31 sebesar 39,8 °C dan *relative humidity* terendah dengan nilai 20,0%. Penurunan temperatur dan nilai *relative humidity* tinggi dikarenakan massa air yang keluar dari batubara lebih banyak daripada kecepatan 2,5 m/s dan 2 m/s.
2. Dengan *moisture content* batubara awal sebesar 33,303 %, kecepatan 3 m/s dapat mengurangi *moisture content* batubara pada akhir pengeringan berturut-turut sebesar 3,025 %, kecepatan 2,5 m/s mampu mengurangi *moisture content* dari

36,383 % menjadi 8,569 %, kecepatan 2 m/s mampu mengurangi moisture content dari 34,804 % menjadi 15,357 %.

3. Dari ketiga variasi kecepatan, pada menit 1 kecepatan 3 m/s memiliki nilai *drying rate* sebesar 6,7295 %/menit. Kecepatan 2,5 m/s memiliki nilai *drying rate* sebesar 5,0549 %/menit. Kecepatan 2 m/s memiliki nilai *drying rate* sebesar 3,6099 %/menit.
4. Dari ketiga variasi kecepatan, pada menit 1 kecepatan 3 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 13,0150 g/kg. Kecepatan 2,5 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 12,9640 g/kg. Kecepatan 2 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 10,7520 g/kg.
5. Dari ketiga variasi kecepatan, kecepatan 3 m/s memiliki koefisien perpindahan massa sebesar 0,079012 m/s, koefisien perpindahan massa pada kecepatan 2,5 m/s sebesar 0,072837 m/s dan koefisien perpindahan massa pada kecepatan 2 m/s sebesar 0,066007 m/s.

5.2 Saran

Dari eksperimen yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang bertujuan agar eksperimen selanjutnya dapat menghasilkan performa yang lebih baik lagi, seperti berikut ini:

1. Memastikan kondisi alat ukur pada kondisi baik agar hasil data eksperimen akurat.
2. Melakukan perawatan terhadap alat eksperimen agar performa dan reliability alat tetap terjaga.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

1. Incropera Frank P, Dewitt David P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th Edition**. John Wiley & Sons Inc : 2008.
2. Mujumdar Arun S. **Handbook of Industrial Drying 3rd Edition**. Taylor & Francis Group : 2006
3. Kunii Daizo. **Fluidization Engineering 2nd Edition**. Butterworth-Heinemann : 1991
4. ASTM D3173 “Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke”
5. Zhao Pengfei. **Effect of Operating Conditions on Drying Chinese Lignite in a Vibration Fluidized Bed**. 2014. School of Electric Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou. China.
6. Levy, Edward K., Sarunac, Bilirgen, Caram. 2006. *Use of Coal Drying To Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants*. Energy Research Center Lehigh University. Bethlehem. Moran MJ, Shapiro HN. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. John Wiley & Sons Inc.; 2006.
7. **Tim Kajian Batubara Nasional**. 2006. *Batubara Indonesia*. Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara. Indonesia.
8. **Direktorat Jendral Mineral Batubara**. 2011. *Pasokan Batubara (2004-2012)*. Indonesia.

9. www.litbang.esdm.go.id . Maret 2015

10. <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/drying5.htm> .
Maret 2015

Lampiran 1

Tabel Data Hasil Eksperimen

T	T.inlet	RH in	Kecepatan 3m/s				Kecepatan 2,5 m/s				Kecepatan 2 m/s			
			T.outlet	RH out	Berat Basah	Berat Kering	T.outlet	RH out	Berat Basah	Berat Kering	T.outlet	RH out	Berat Basah	Berat Kering
(Menit)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(g)	(g)	(°C)	(%)	(g)	(g)	(°C)	(%)	(g)	(g)
0	40	15	40,0	15	2,4442	1,6302	40,0	15,0	2,4442	1,6302	40,0	15,0	2,4442	1,6302
1	40	15	32,3	64,7	3,5916	2,6071	33,3	58,7	1,8857	1,3329	33,6	54,2	4,4733	3,0789
2	40	15	33,5	55	2,9183	2,2263	34,2	48,0	2,4464	1,8225	34,8	47,8	3,127	2,2532
3	40	15	34,2	47,2	1,6982	1,3747	34,8	42,2	2,6364	2,0438	35,5	38,9	1,1698	0,8725
4	40	15	35,5	40,9	3,0268	2,5248	35,9	37,3	3,3278	2,6781	36,1	35,7	2,6976	2,0635
5	40	15	35,8	36,4	3,1827	2,7614	36,3	34,7	2,0415	1,6941	36,5	34,0	2,5164	1,9732
7	40	15	36,8	30,8	3,0255	2,6987	36,9	28,7	2,7386	2,3247	37,2	28,0	1,5513	1,2387
9	40	15	37,2	29,1	2,5194	2,3066	37,3	27,1	3,089	2,6741	37,5	26,4	1,8963	1,5365
11	40	15	37,4	25,7	1,4887	1,3843	37,6	24,6	3,0348	2,6646	37,8	23,6	1,2653	1,0369
16	40	15	38,3	23,9	2,5789	2,4281	38,3	22,8	2,8039	2,4932	38,5	22,1	1,7368	1,4353
21	40	15	38,6	23	2,2804	2,1711	38,9	21,9	1,9109	1,7188	39,0	21,6	1,2839	1,0707
26	40	15	39,0	22,2	3,5148	3,3815	39,2	21,0	2,3537	2,1415	39,3	20,9	1,9779	1,6647
31	40	15	39,3	21,8	1,7199	1,6682	39,3	20,3	3,8806	3,5627	39,5	20,0	1,5862	1,3442

Lampiran 2

Tabel Data Hasil Perhitungan Kecepatan 3 m/s

No	v	t	Sudut	A (m ²)	Q	T.inlet	RH in	T.outlet	RH out	T.wb	h	ω	Berat Basah	Berat Kering
	(m/s)	(Menit)	(°)	(m ²)	(m ³ /s)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	(g/kg)	(g)	(g)
1	3	0	10°	0,015936	0,047807	40	15	40,0	15	25,1	76,148	6,901	2,4442	1,6302
2		1	10°	0,015936	0,047807	40	15	32,3	64,7	24,8	75,369	19,916	3,5916	2,6071
3		2	10°	0,015936	0,047807	40	15	33,5	55	25,3	77,359	18,058	2,9183	2,2263
4		3	10°	0,015936	0,047807	40	15	34,2	47,2	24,7	74,674	16,064	1,6982	1,3747
5		4	10°	0,015936	0,047807	40	15	35,5	40,9	25,2	76,892	14,932	3,0268	2,5248
6		5	10°	0,015936	0,047807	40	15	35,8	36,4	24,9	75,461	13,480	3,1827	2,7614
7		7	10°	0,015936	0,047807	40	15	36,8	30,8	25,4	77,638	12,021	3,0255	2,6987
8		9	10°	0,015936	0,047807	40	15	37,2	29,1	25,4	77,795	11,600	2,5194	2,3066
9		11	10°	0,015936	0,047807	40	15	37,4	25,7	24,2	72,631	10,336	1,4887	1,3843
10		16	10°	0,015936	0,047807	40	15	38,3	23,9	24,6	74,386	10,088	2,5789	2,4281
11		21	10°	0,015936	0,047807	40	15	38,6	23	24,6	74,322	9,863	2,2804	2,1711
12		26	10°	0,015936	0,047807	40	15	39,0	22,2	24,6	74,415	9,725	3,5148	3,3815
13		31	10°	0,015936	0,047807	40	15	39,3	21,8	24,5	73,786	9,704	1,7199	1,6682

Lampiran 2 (Lanjutan)

Tabel Data Hasil Perhitungan Kecepatan 3 m/s

M. Uap air (g)	MC	ρ udara	\dot{m}	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara	ω udara	ω Inlet	Massa Udara	$\Delta\omega$	Drying Rate	Massa Uap Air pada Udara
(g)	(%)	(kg/m ³)	(kg/s)	(g)	(g)	(g/kg)	(g/kg)	(kg)	(g/kg)		(g)
0,8140	33,303	1,127	0,053878	199,8169	0,0000	6,901	6,901	3,2327	0,0000	0,0000	0,0000
0,9845	27,411	1,127	0,053878	164,4671	35,3498	19,916	6,901	3,2327	13,0150	5,8916	42,0733
0,6920	23,713	1,127	0,053878	142,2781	22,1890	18,058	6,901	3,2327	11,1570	3,6982	36,0670
0,3235	19,047	1,127	0,053878	114,2812	27,9969	16,064	6,901	3,2327	9,1630	4,6661	29,6210
0,5020	16,586	1,127	0,053878	99,5150	14,7662	14,932	6,901	3,2327	8,0310	2,4610	25,9616
0,4213	13,236	1,127	0,053878	79,4186	20,0964	13,480	6,901	3,2327	6,5790	3,3494	21,2678
0,3268	10,801	1,127	0,053878	64,8061	14,6125	12,021	6,901	6,4654	5,1200	1,2177	16,5513
0,2128	8,445	1,127	0,053878	50,6721	14,1341	11,600	6,901	6,4654	4,6990	1,1778	15,1903
0,1044	7,013	1,127	0,053878	42,0770	8,5951	10,336	6,901	6,4654	3,4350	0,7163	11,1042
0,1508	5,847	1,127	0,053878	35,0847	6,9923	10,088	6,901	16,1634	3,1870	0,2331	10,3025
0,1093	4,793	1,127	0,053878	28,7581	6,3266	9,863	6,901	16,1634	2,9620	0,2109	9,5752
0,1333	3,793	1,127	0,053878	22,7552	6,0029	9,725	6,901	16,1634	2,8240	0,2001	9,1291
0,0517	3,006	1,127	0,053878	18,0359	4,7193	9,704	6,901	16,1634	2,8030	0,1573	9,0612

Lampiran 3

Tabel Data Hasil Perhitungan Kecepatan 2,5 m/s

No	v (m/s)	t (Menit)	Sudut (°)	A (m ²) (m ²)	Q (m ³ /s)	T.inlet (°C)	RH in (%)	T.outlet (°C)	RH out (%)	T.wb (°C)	h (kJ/kg)	ω (g/kg)	Berat Basah (g)	Berat Kering (g)
1	2,5	0	10°	0,015936	0,039839	40	15	40,0	15,0	25,1	76,148	6,901	2,4442	1,6302
2		1	10°	0,015936	0,039839	40	15	33,3	58,7	23,9	71,528	19,089	1,8857	1,3329
3		2	10°	0,015936	0,039839	40	15	34,2	48,0	24,1	72,304	16,343	2,4464	1,8225
4		3	10°	0,015936	0,039839	40	15	34,8	42,2	23,5	70,039	14,820	2,6364	2,0438
5		4	10°	0,015936	0,039839	40	15	35,9	37,3	24,1	72,492	13,898	3,3278	2,6781
6		5	10°	0,015936	0,039839	40	15	36,3	34,7	23,8	71,249	13,202	2,0415	1,6941
7		7	10°	0,015936	0,039839	40	15	36,9	28,7	23,6	70,403	11,249	2,7386	2,3247
8		9	10°	0,015936	0,039839	40	15	37,3	27,1	23,6	70,401	10,849	3,089	2,6741
9		11	10°	0,015936	0,039839	40	15	37,6	24,6	23,8	70,872	9,996	3,0348	2,6646
10		16	10°	0,015936	0,039839	40	15	38,3	22,8	24,0	71,809	9,617	2,8039	2,4932
11		21	10°	0,015936	0,039839	40	15	38,9	21,9	23,8	70,839	9,539	1,9109	1,7188
12		26	10°	0,015936	0,039839	40	15	39,2	21,0	23,7	70,809	9,292	2,3537	2,1415
13		31	10°	0,015936	0,039839	40	15	39,3	20,3	23,7	70,564	9,027	3,8806	3,5627

Lampiran 3 (Lanjutan)

Tabel Data Hasil Perhitungan Kecepatan 2,5 m/s

M.Uap air (g)	MC	ρ udara	\dot{m}	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara	ω Udara	ω Inlet	Massa Udara	$\Delta\omega$	Drying Rate	Massa Uap Air pada Udara
(g)	(%)	(kg/m ³)	(kg/s)	(g)	(g)	(g/kg)	(g/kg)	(kg)	(g/kg)		
0,8140	33,303	1,127	0,044898	199,8169	0,0000	6,901	6,901	2,6939	0,0000	0,0000	0,0000
0,5528	29,317	1,127	0,044898	175,9012	23,9158	19,089	6,901	2,6939	12,1880	3,9860	32,8332
0,6239	25,503	1,127	0,044898	153,0167	22,8845	16,343	6,901	2,6939	9,4420	3,8141	25,4358
0,5926	22,477	1,127	0,044898	134,8594	18,1573	14,820	6,901	2,6939	7,9190	3,0262	21,3330
0,6497	19,523	1,127	0,044898	117,1405	17,7189	13,898	6,901	2,6939	6,9970	2,9532	18,8492
0,3474	17,017	1,127	0,044898	102,1014	15,0391	13,202	6,901	2,6939	6,3010	2,5065	16,9742
0,4139	15,114	1,127	0,044898	90,6814	11,4200	11,249	6,901	5,3878	4,3480	0,9517	11,7131
0,4149	13,432	1,127	0,044898	80,5892	10,0922	10,849	6,901	5,3878	3,9480	0,8410	10,6355
0,3702	12,198	1,127	0,044898	73,1910	7,3982	9,996	6,901	5,3878	3,0950	0,6165	8,3376
0,3107	11,081	1,127	0,044898	66,4860	6,7050	9,617	6,901	13,4695	2,7160	0,2235	7,3166
0,1921	10,053	1,127	0,044898	60,3171	6,1688	9,539	6,901	13,4695	2,6380	0,2056	7,1065
0,2122	9,016	1,127	0,044898	54,0936	6,2236	9,292	6,901	13,4695	2,3910	0,2075	6,4411
0,3179	8,192	1,127	0,044898	49,1522	4,9414	9,027	6,901	13,4695	2,1260	0,1647	5,7272

Lampiran 4

Tabel Data Hasil Perhitungan Kecepatan 2 m/s

No	v	t	Sudut	A (m ²)	Q	T.inlet	RH in	T.outlet	RH out	T.wb	h	ω	Berat Basah	Berat Kering
	(m/s)	(Menit)	(°)	(m ²)	(m ³ /s)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(kJ/kg)	(g/kg)	(g)	(g)
1	2	0	10°	0,015936	0,031871	40	15	40,0	15,0	25,1	76,148	6,901	2,4442	1,6302
2		1	10°	0,015936	0,031871	40	15	33,6	54,2	23,8	70,973	17,891	4,4733	3,0789
3		2	10°	0,015936	0,031871	40	15	34,8	47,8	23,5	69,871	16,840	3,127	2,2532
4		3	10°	0,015936	0,031871	40	15	35,5	38,9	23,8	71,138	14,185	1,1698	0,8725
5		4	10°	0,015936	0,031871	40	15	36,1	35,7	24,0	71,786	13,439	2,6976	2,0635
6		5	10°	0,015936	0,031871	40	15	36,5	34,0	24,2	72,598	13,075	2,5164	1,9732
7		7	10°	0,015936	0,031871	40	15	37,2	28,0	24,1	72,186	11,234	1,5513	1,2387
8		9	10°	0,015936	0,031871	40	15	37,5	26,4	23,9	71,562	10,681	1,8963	1,5365
9		11	10°	0,015936	0,031871	40	15	37,8	23,6	23,7	70,724	9,690	1,2653	1,0369
10		16	10°	0,015936	0,031871	40	15	38,5	22,1	24,1	72,242	9,419	1,7368	1,4353
11		21	10°	0,015936	0,031871	40	15	39,0	21,6	24,3	72,91	9,458	1,2839	1,0707
12		26	10°	0,015936	0,031871	40	15	39,3	20,9	24,3	72,952	9,298	1,9779	1,6647
13		31	10°	0,015936	0,031871	40	15	39,5	20,0	24,3	73,208	8,989	1,5862	1,3442

Lampiran 4 (Lanjutan)

Tabel Data Hasil Perhitungan Kecepatan 2 m/s

M.Uap air (g)	MC	ρ udara	\dot{m}	H ₂ O pada Batubara	H ₂ O dari Batubara	ω udara	ω Inlet	Massa Udara	$\Delta\omega$	Drying Rate	Massa Uap Air pada Udara
(g)	(%)	(kg/m ³)	(kg/s)	(g)	(g)	(g/kg)	(g/kg)	(kg)	(g/kg)		
0,8140	33,303	1,127	0,035919	199,8169	0,0000	6,901	6,901	2,1551	0,0000	0,0000	0,0000
1,3944	31,172	1,127	0,035919	187,0294	12,7875	17,891	6,901	2,1551	10,9900	2,1312	23,6847
0,8738	27,944	1,127	0,035919	167,6623	19,3671	16,840	6,901	2,1551	9,9390	3,2279	21,4197
0,2973	25,415	1,127	0,035919	152,4876	15,1747	14,185	6,901	2,1551	7,2840	2,5291	15,6979
0,6341	23,506	1,127	0,035919	141,0365	11,4511	13,439	6,901	2,1551	6,5380	1,9085	14,0902
0,5432	21,586	1,127	0,035919	129,5184	11,5181	13,075	6,901	2,1551	6,1740	1,9197	13,3057
0,3126	20,151	1,127	0,035919	120,9050	8,6133	11,234	6,901	4,3102	4,3330	0,7178	9,3381
0,3598	18,974	1,127	0,035919	113,8427	7,0623	10,681	6,901	4,3102	3,7800	0,5885	8,1463
0,2284	18,051	1,127	0,035919	108,3063	5,5364	9,690	6,901	4,3102	2,7890	0,4614	6,0106
0,3015	17,360	1,127	0,035919	104,1571	4,1493	9,419	6,901	10,7756	2,5180	0,1383	5,4266
0,2132	16,606	1,127	0,035919	99,6339	4,5231	9,458	6,901	10,7756	2,5570	0,1508	5,5106
0,3132	15,835	1,127	0,035919	95,0099	4,6241	9,298	6,901	10,7756	2,3970	0,1541	5,1658
0,2420	15,257	1,127	0,035919	91,5395	3,4703	8,989	6,901	10,7756	2,0880	0,1157	4,4999

Lampiran 5

Tabel Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

No	T	v	D	ρ	μ	ν	D_{AB}	Re	Sc	Sh	h_m
	(°C)	(m/s)	(m)	(kg/m ³)	(m ² /s)	(N.s/m ²)	(m ² /s)				(m/s)
1	40	3	0,006	1,127	1,91E-05	0,000017198	0,0000244	1063,54	0,704143	19,41004	0,079012
2	40	2,5	0,006	1,127	1,91E-05	0,000017198	0,0000244	886,28	0,704143	17,89312	0,072837
3	40	2	0,006	1,127	1,91E-05	0,000017198	0,0000244	709,03	0,704143	16,21524	0,066007

RIWAYAT PENULIS



Stevanus Franciscus Wahyudi Notohardjo lahir di Jember, 24 Maret 1992 merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari TKK Siswa Rini Jember, kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SDK Maria Fatima Jember selama 6 tahun yakni pada tahun 1998-2004. Lalu penulis melanjutkan pendidikan di SMPK Maria Fatima Jember selama 3 tahun yakni di tahun 2004-2007 kemudian melanjutkan di SMAK Santo Paulus Jember selama 3 tahun yakni tahun 2007-2010. Lalu penulis melanjutkan pendidikan tingginya menempuh jalur sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin dengan NRP : 2110100092.

Selama berkuliah di Teknik Mesin ITS banyak sekali pengalaman yang saya tidak pernah rasakan selama duduk di bangku sekolah. Dari awal masuk kuliah di Teknik Mesin saya mendapat kaderisasi dari para senior. Penulis juga terdaftar sebagai anggota di Persekutuan Mahasiswa Kristen ITS. Penulis juga terlibat dalam kegiatan rohani sebagai anggota hingga akhirnya memimpin sel grup Gereja Mawar Sharon yang bernama Connect Group mulai dari tahun 2010 hingga saat ini. Penulis aktif mengikuti kegiatan laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, menjabat sebagai Asisten Praktikum selama 2 periode. Kegiatan pelatihan yang pernah diikuti penulis lebih ke arah peningkatan diri diantaranya kegiatan orientasi dan pengenalan ITS, “GERIGI ITS” 2011, LKMM Pra Tingkat Dasar 2011, dan LKMM Tingkat Dasar 2012, kemudian diluar lingkup ITS mengemban dan memimpin sel grup di Gereja Mawar Sharon Surabaya sebagai dari tahun 2010. Untuk informasi dan masukan tentang penulisan ini bisa langsung diberikan pada email stevefranciscus@gmail.com

Studi Eksperimen Pengaruh Kecepatan *Inlet Drying Chamber* Terhadap Laju Pengeringan Batubara *Low-Rank* Pada *Swirling Fluidized Bed Dryer*

Stevanus Franciscus Wahyudi Notohardjo, dan Prabowo
Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahmank Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: prabowo@me.its.ac.id

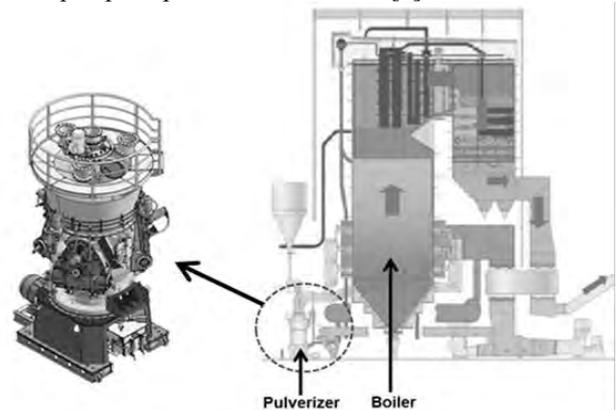
Abstrak— Salah satu sumber penghasil energi listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Di Indonesia hampir semua PLTU menggunakan batubara kalori menengah dan rendah sebagai bahan bakar utama yang memiliki kandungan *moisture* tinggi. Penggunaan batubara dengan nilai kalori rendah pada PLTU dapat berpengaruh terhadap kinerja *pulverizer*. Kinerja *pulverizer* akan semakin berat dikarenakan kapasitas batubara yang dibutuhkan untuk pembakaran semakin banyak. Hal tersebut terjadi karena kualitas batubara yang tersedia tidak sesuai dengan spesifikasi desain awal *boiler* yang didesain menggunakan batubara kalori tinggi. Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu teknologi yang dapat meningkatkan kualitas batubara, berupa *swirling fluidized bed coal dryer*. Penelitian dilakukan dengan studi eksperimen menggunakan alat percobaan yaitu *swirling fluidized bed coal dryer*. Udara panas dengan temperatur 40°C dihembuskan oleh blower ke dalam chamber dengan melewati *distributor bed* berupa *blade* yang membentuk sudut 10° sehingga menyebabkan *swirling* didalam *chamber*. Pengambilan data dilakukan dengan menimbang massa sampel batubara basah setiap 1 menit sebanyak 5 kali, 2 menit sebanyak 3 kali, dan 5 menit sebanyak 4 kali sehingga total waktu pengeringan 31 menit.. Percobaan dilakukan dengan variasi kecepatan *inlet* 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3 m/s dengan massa batubara 600 gram dan ukuran partikel 6 mm, pengeringan dilanjutkan menggunakan oven dengan temperatur 105⁰ C selama 60 menit berdasarkan standar ASTM D 3173 untuk mendapatkan massa sampel batubara kering. Dari hasil eksperimen diketahui bahwa pada kecepatan 2 m/s, 2,5 m/s dan 3 m/s didapat *moisture content* batubara berturut-turut sebesar 15,357 %; 8,569 %; dan 3,025 %. Untuk *drying rate* berturut-turut sebesar 3,6099 %/menit; 5,0549 %/menit; dan 6,7295 %/menit.

Kata Kunci— *Swirling Coal Dryer*, Fluidisasi, Psychometric

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber daya alam yang melimpah, salah satunya adalah batubara. Batubara di Indonesia mengalami peningkatan konsumsi baik dari segi ekspor maupun impor. Konsumsi batubara di Indonesia sendiri banyak digunakan untuk industri salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebagian besar PLTU di Indonesia menggunakan batubara kalori rendah sebagai bahan bakar utama. *Boiler* PLTU didesain untuk menggunakan batubara dengan kadar air (*moisture*) rendah dan nilai kalor (*heating value*) tinggi. Jika digunakan batubara dengan kadar air dan nilai kalor di bawah spesifikasi pembangkit, maka akan berpengaruh pada performa *pulverizer* dan emisi yang dihasilkan [1]. *Pulverizer* berfungsi untuk menghaluskan batubara sebelum masuk *boiler*. Untuk menjamin sistem pembangkit dapat beroperasi secara kontinyu, biasanya dipasang *standby pulverizer* yang digunakan untuk menggantikan fungsi

pulverizer yang mengalami kerusakan. Dengan menggunakan batubara dibawah spesifikasi *boiler* maka suplai batubara yang dibutuhkan untuk memanaskan *boiler* akan semakin tinggi, imbasnya *pulverizer* akan beroperasi secara maksimum sehingga *reliability* dari *pulverizer* akan turun. Untuk memenuhi kapasitas yang diinginkan dari *boiler* tersebut, masalah yang timbul adalah jika terjadi kerusakan pada salah satu *pulverizer* maka kapasitas mill dari batubara akan berkurang, yang akibatnya suplai batubara ke *boiler* juga ikut berkurang, hal ini akan berdampak pada performa dari PLTU [2].



Gambar 1. Boiler dan pulverizer

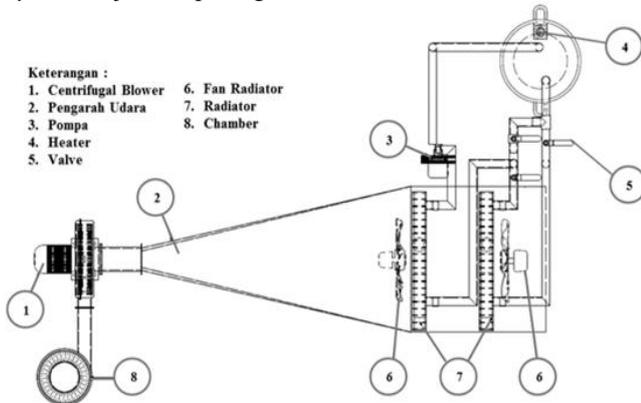
Penelitian terkait dengan teknologi pengeringan batubara pernah dilakukan oleh Levy, Edward K., Sarunac, Bilirgen, Caram (2006). Dalam penelitiannya yang berjudul “Use Of Coal Drying To Reduce Waterconsumed In Pulverized Coal Power Plants” melakukan penelitian terhadap efek pengeringan batubara dalam upaya untuk mengurangi kandungan air dalam batubara. Pengfei Zhao, dkk (2014), juga melakukan penelitian yang berjudul “Effect of Operating Conditions on Drying Chinese Lignite in a Vibration Fluidized Bed”, penelitian ini dilakukan terhadap beberapa faktor yang diduga berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara seperti kekuatan getaran, ukuran partikel batubara, kecepatan udara pemanas, temperatur *air heater* dan *bed height* batubara merupakan beberapa variabel yang diteliti pengaruhnya terhadap laju pengeringan batubara.

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukannya didapatkan bahwa kecepatan udara pemanas pada sisi masuk ruangan pengering berpengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Pada penelitian ini kecepatan udara pemanas pada sisi *inlet* akan meningkatkan laju pengeringan batubara apabila kecepatan ditingkatkan hingga nilai tertentu [3].

II. METODOLOGI

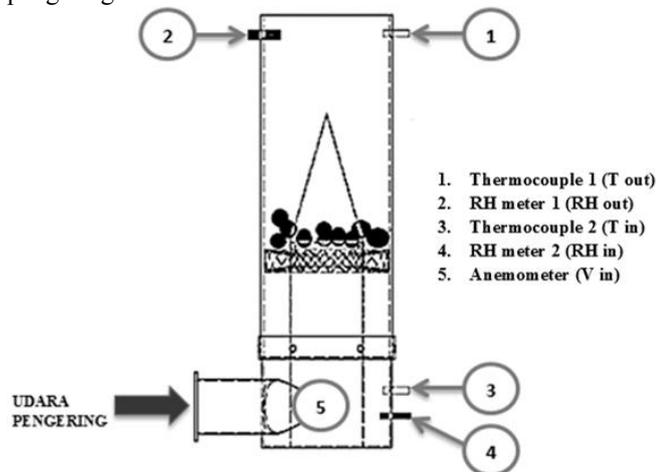
A. Metode Eksperimen

Berikut adalah skema alat *swirling fluidized bed coal dryer* ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 2. *Swirling fluidized bed coal dryer*

Cara kerja alat dari gambar 1 dimana alat ini terdapat 2 bagian yaitu bagian penghasil udara pengering dan aliran fluidisasi. Bagian penghasil udara pengering terdapat 2 radiator sebagai peralatan *heat exchanger* antara air (aquades) dengan udara. Awalnya air dipanaskan di tangki reservoir menggunakan *electric heater* hingga temperatur air 90°C kemudian disirkulasikan oleh pompa menuju radiator dan kembali lagi ke tangki reservoir. Untuk aliran udara pada radiator menggunakan 2 buah fan radiator 12 V. Dari sistem radiator maka terjadi perpindahan panas dari air ke udara. Karena proses itu terbentuklah udara pengering. Udara pengering tersebut akan dihembuskan oleh blower menuju *chamber* dengan kecepatan tertentu. Kecepatan udara diukur menggunakan anemometer pada keluaran blower sesuai dengan kecepatan fluidisasi. *Chamber* ini terdapat *bed distributor* berupa susunan *blade* dengan arah sudut tertentu. *Bed distributor* ini bertujuan untuk mengarahkan aliran udara pengering, sehingga terjadi fluidisasi menyerupai gerakan *cyclone*. Dalam *chamber* ini terjadilah proses perpindahan panas secara konveksi antara batubara dengan udara pengering. Dimana air yang ada didalam batubara akan keluar berupa uap air bersama udara pengering.



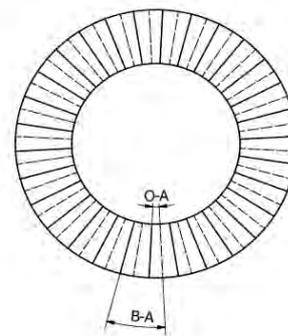
Gambar 3. Posisi alat ukur

Selama proses pengujian tersebut terdapat parameter-parameter yang diukur yaitu :

1. T_{out} menggunakan *Thermocouple* 1 type K, mengukur temperatur *dry bulb* udara keluaran *chamber*
2. RH *out* menggunakan RH meter 1, mengukur nilai *relative humidity* udara saat keluar *chamber*.
3. T_{in} menggunakan *Thermocouple* 2 type K, mengukur temperatur *dry bulb* udara masuk *chamber*
4. RH *in* menggunakan RH meter 2, mengukur nilai *relative humidity* udara saat masuk *chamber*.
5. Anemometer untuk menghitung kecepatan udara saat masuk *chamber*.

B. Variasi Kecepatan Inlet

Pada penelitian ini yang divariasikan adalah sudut kecepatan inlet sebelum masuk *blade distributor* dengan variasi 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3m/s dengan kecepatan inlet sebesar 10°, dan total *blade* yang digunakan adalah 30 *blade*. Pengaturan kecepatan dengan mengatur pada *sentrifugal blower* dengan *voltage regulator* yang diukur menggunakan anemometer



Gambar 4. Geometri *Distributor Blade* 10°



Gambar 5. *Sentrifugal Blower* dan *Voltage Regulator*

C. Analisa Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa

Analisa yang digunakan untuk menghitung proses perpindahan panas antara udara pengering dan batu bara adalah [4]:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \tag{1}$$

Koefisien perpindahan panas secara konveksi (h), dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [4]:

$$h = Nu \cdot \frac{D}{k} \tag{2}$$

Untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan massa secara konveksi (h_m) ditentukan dari persamaan sebagai berikut [4]:

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \tag{3}$$

Untuk mendapatkan nilai Sherwood Number (Sh) maka dibutuhkan persamaan Reynold Number sebagai berikut [4]:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (4)$$

Mencari Sherwood Number (Sh) dengan persamaan [4]:

$$Sh = 2 + 0.6Re_D^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Jadi,

$$h_m = Sh \cdot \left(\frac{D_{AB}}{D} \right) \quad (6)$$

Dari persamaan di atas, Maka perpindahan massa yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [4]:

$$n_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (7)$$

D. Prosedur Eksperimen

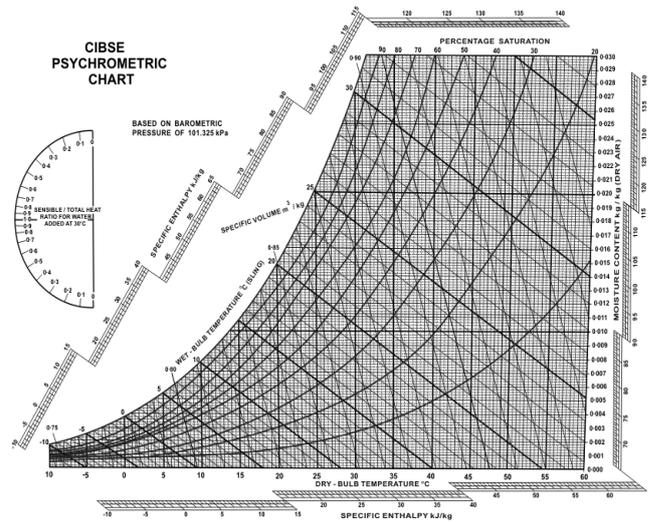
Penelitian dilakukan dengan variasi kecepatan inlet 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3 m/s, dan menggunakan batubara dengan ukuran diameter 6 mm. Massa batubara yang dikeringkan sebesar 600 gram. Sebelum proses pengeringan dimulai, lakukan pengukuran kecepatan udara pada keluaran blower sebelum memasuki *blade distributor* sesuai dengan kecepatan yang telah ditentukan kemudian pasang *bed distributor*. Proses pengeringan dimulai setelah temperatur udara masuk chamber steady 40°C. Setelah itu masukan batubara 600 gram. Untuk mengetahui perubahan *moisture content* selama proses pengeringan diambil massa sampel batubara basah dengan interval waktu untuk 1 menit 5 kali, 2 menit 3 kali, dan interval 5 menit 4 kali, setiap sampel di timbang dan didapatkan data massa basah, kemudian untuk semua massa sampel batubara basah dilakukan pengovenan selama 60 menit dengan temperatur 105°C sesuai standar ASTM D 3173 dan hasil setelah dilakukan proses tersebut sampel kemudian di timbang kembali untuk mengetahui perbedaannya dan didapatkan massa kering. Dari penelitian didapatkan massa sampel batubara kering, massa batubara basah, T_{Dbin} , T_{Dbout} , *relative humidity* inlet dan *relative humidity outlet*.

Dari hasil penimbangan massa sampel batubara basah ($ms_{c,basah}$) dan massa sampel batubara kering ($ms_{c,kering}$), maka dapat diketahui *moisture content* batubara dengan persamaan, sebagai berikut:

$$MC (\%) \text{ wb} = \frac{ms_{c,basah} - ms_{c,kering}}{m_{c,basah}} \times 100\% \quad (8)$$

E. Psychrometric Chart

Proses perpindahan massa dari sisi udara pengering dapat ditentukan dari *psychrometric chart*. *Psychrometric chart* merupakan grafik yang menampilkan campuran antara uap air dengan udara. Didalam *psychrometric chart* sendiri terdapat beberapa parameter dan *properties* dari campuran tersebut seperti *enthalpy*, *humidity ratio*, *relative humidity*, *specific volume*, *temperature dry bulb* dan *temperature wet bulb* [5].



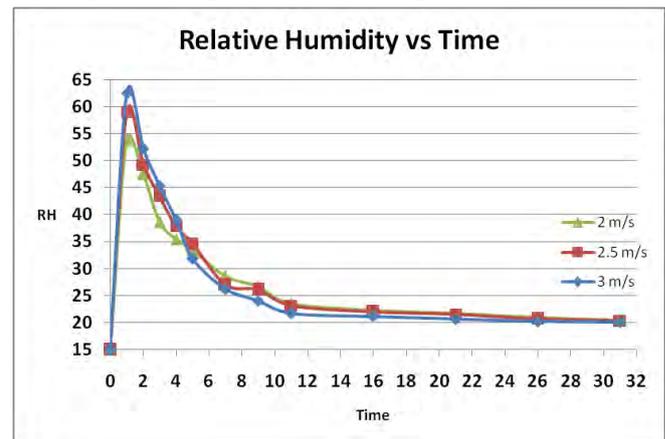
Gambar 6. Psychrometric Chart

Untuk mencari besarnya massa uap air dalam udara maka dapat dicari dari selisih *humidity ratio* udara pengering masuk chamber dengan *humidity ratio* udara keluar chamber setelah melewati batubara, sedangkan untuk mencari besarnya massa uap air yang dipindahkan oleh udara pengering dapat ditentukan dari selisih *moisture content*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian eksperimen *swirling fluidized bed coal dryer* dengan variasi kecepatan inlet didapatkan beberapa analisa untuk mengetahui pengaruh kecepatan inlet terhadap karakteristik pengeringan batubara. Dari sisi batubara dapat dilihat dari grafik *moisture content*, sedangkan dari sisi udara dapat dilihat dari *psychrometric chart* dengan parameter temperatur udara keluar *chamber* dan relative humidity keluar *chamber*.

A. Pengaruh Kecepatan Inlet terhadap Relative Humidity



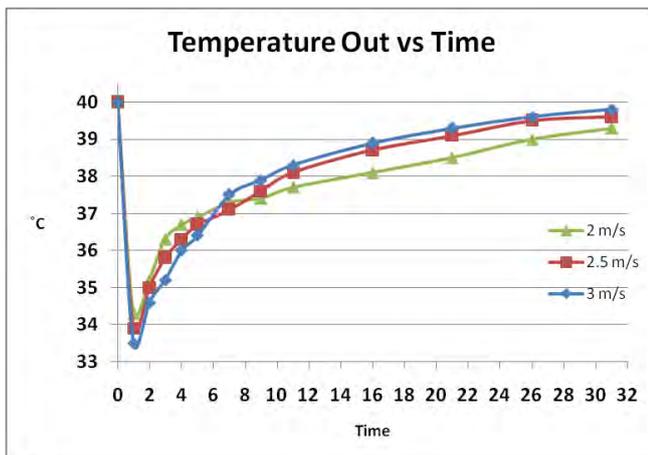
Gambar 7. Pengaruh kecepatan inlet terhadap relative humidity

Relative humidity adalah perbandingan antara jumlah uap air yang ada di dalam udara dengan jumlah uap air maksimum (jenuh) pada suhu tertentu. Pada gambar 7 menunjukkan besarnya nilai *relative humidity* pada udara pengering keluaran chamber (*chamber out*) dengan variasi kecepatan inlet 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3 m/s. Perubahan nilai *relative humidity* dengan kecepatan inlet 2 m/s dari 53,8 % menjadi 20,4 %, kecepatan inlet 2 m/s dari 59 % menjadi

20,3 %, dan kecepatan inlet 3 m/s dari 62,5% menjadi 20 %. Nilai *relative humidity* tiap variasi kecepatan inlet cenderung mendekati *relative humidity* udara pengering yaitu sebesar 15%. Perbedaan nilai *relative humidity* antar variasi kecepatan inlet tersebut menandakan perbedaan massa air yang ada di udara pengering outlet. Terjadinya penurunan *relative humidity* pada tiap menitnya disebabkan *moisture content* batubara semakin rendah sehingga uap air yang terlepas dari batubara semakin rendah.

Dari grafik diatas juga dapat dilihat bahwa untuk kecepatan 3 m/s pada menit ke 5 nilai Rh akan *crossing* dengan Rh 2,5 dan 2 m/s dan untuk kecepatan 2,5 m/s pada menit ke 7 nilai Rh akan *crossing* dengan dan 2 m/s. Hal ini terjadi karena pada menit-menit awal terjadi laju pengeringan yang naik yang relatif tinggi sehingga pada suatu waktu laju perpindahan massa dari kecepatan yang lebih tinggi akan menjadi lebih kecil karena terjadi laju pengeringan menurun yang lebih awal daripada kecepatan rendah.

B. Pengaruh Kecepatan Inlet terhadap Temperatur Udara Keluar Chamber



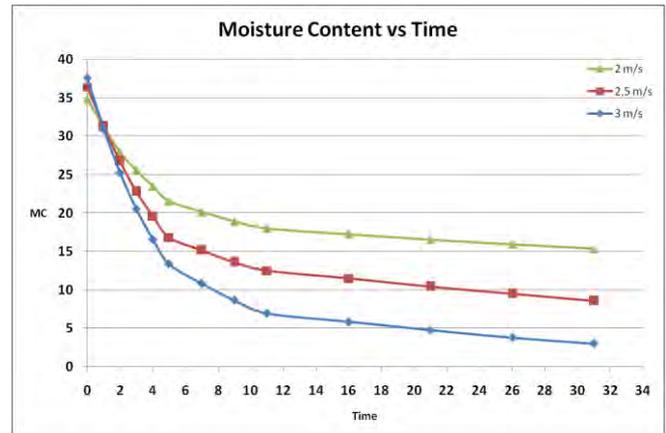
Gambar 8. Pengaruh kecepatan inlet terhadap temperatur udara keluar chamber

Pada gambar 8 dapat diamati bahwa untuk ketiga variasi kecepatan inlet memiliki kenaikan trendline dengan nilai temperatur udara keluaran chamber lebih rendah dari temperatur udara masuk chamber. Pada menit 1 untuk kecepatan inlet 2 m/s memiliki nilai temperatur sebesar 34,3 °C, kecepatan inlet 2,5 m/s sebesar 33,9 m/s, dan kecepatan inlet 3 m/s sebesar 33,5 m/s. Tinggi rendahnya temperatur keluaran dari chamber dipengaruhi oleh *moisture content* pada batubara.

Penurunan temperatur pada udara pengering dikarena adanya transfer panas dari udara pengering dengan permukaan batubara. Pada saat awal pengeringan kalor yang diterima oleh batubara cukup besar karena perbedaan temperatur permukaan batubara dengan udara pengering cukup besar. Kalor yang diterima oleh batubara kemudian akan disimpan pada batubara yang menyebabkan temperatur permukaan batubara menjadi meningkat. Karena temperatur permukaan meningkat menyebabkan selisih temperatur antara permukaan batubara dengan udara pengering menjadi lebih kecil. Semakin kecil perbedaan antara permukaan batubara dengan udara pengering menyebabkan kalor yang ditransfer dari udara pengering ke permukaan batubara menjadi lebih kecil. Hal inilah yang menyebabkan temperatur udara keluar chamber pada awal pengeringan

menjadi lebih rendah dan meningkat seiring waktu pengeringan.

C. Pengaruh Kecepatan Inlet terhadap Moisture Content Batubara

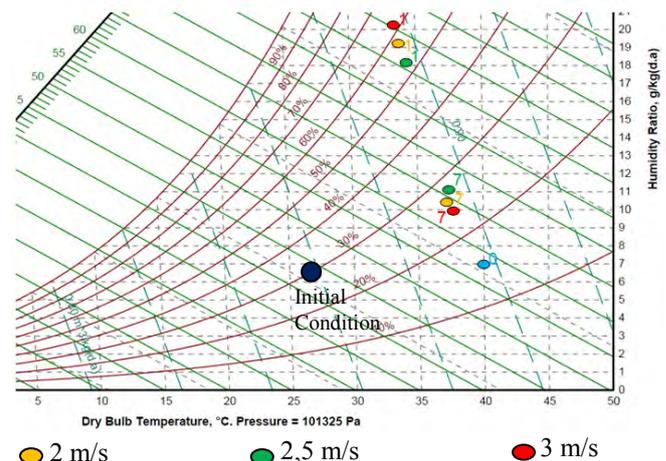


Gambar 9. Pengaruh kecepatan inlet terhadap moisture content batubara

Proses pengeringan merupakan proses penyerapan atau perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering. Gambar di atas menunjukkan kemampuan untuk mengeringkan batubara dengan variasi kecepatan inlet. Dimana pada kecepatan inlet 2 m/s mengeringkan batubara dari *moisture content* 34,804 % menjadi 15,357 %. Kecepatan inlet 2,5 m/s dari *moisture content* 36,383 % menjadi 8,569 %. Dan kecepatan inlet 3 m/s dari *moisture content* 37,65 % menjadi 3,025 %.

Gambar di atas sesuai dengan teori dimana semakin tinggi kecepatan (v) maka *Reynold Number* (Re) semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin tinggi *Reynolds Number*, berarti suatu aliran itu semakin turbulen apabila aliran itu semakin turbulen maka perpindahan panas yang terjadi semakin tinggi.

D. Psychrometric Chart

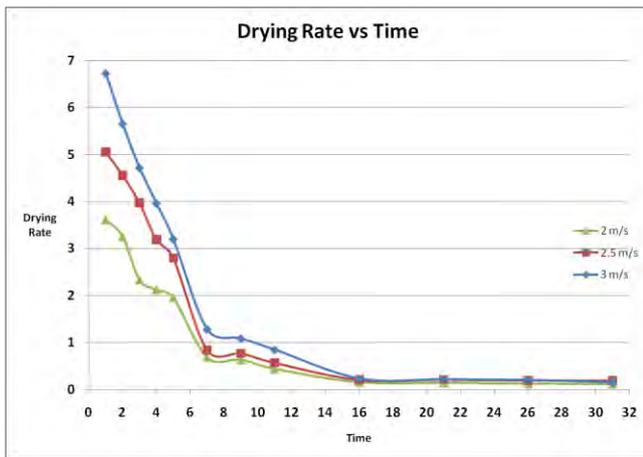


Gambar 10. Pengaruh kecepatan inlet terhadap udara pengering dalam psychrometric chart

Berdasarkan nilai temperatur dan *relative humidity* yang diperoleh dari hasil eksperimen diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan udara pengering maka nilai *relative humidity* pada udara keluar akan semakin tinggi. Proses yang terjadi dalam *psychrometric chart* dengan kecepatan inlet 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3 m/s antara lain:

1. Proses pertama : Proses pengeringan (*cooling dan humidifying*) dimana terjadi penyerapan *moisture content* batubara yang diikuti dengan naiknya nilai *humidity ratio* dan turunnya temperatur udara pengering, perpindahan massa air dari batubara ke udara pengering terjadi akibat *relative humidity* dari udara lebih kecil dibandingkan batubara. (Titik 0-1)
2. Proses kedua : Proses (*Heating dan dehumidifying*) dimana terjadi peningkatan temperatur udara *chamber out* dengan diikuti menurunnya nilai *humidity ratio* dalam udara pengering. Hal ini disebabkan semakin berkurangnya *moisture content* yang terkandung didalam batu bara. (Titik 1-5).

E. Pengaruh Kecepatan inlet Terhadap Drying Rate



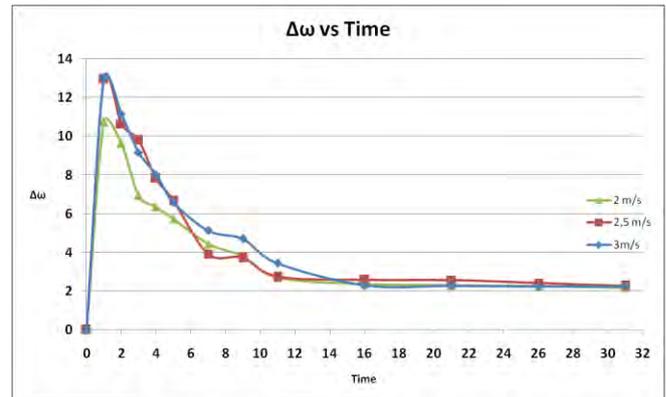
Gambar 11. Pengaruh kecepatan inlet terhadap drying rate

Grafik *drying rate* merupakan grafik *moisture content* fungsi waktu, dimana pada grafik ini menunjukkan perubahan *moisture* pada batubara tiap waktu tertentu. Pada gambar 11 diatas menunjukkan grafik *drying rate* untuk ketiga variasi kecepatan yaitu 2 m/s, 2,5 m/s, dan 3 m/s. Trend grafik diatas memperlihatkan terjadi penurunan yang signifikan pada perubahan *moisture content* pada batubara terhadap waktu pengeringan. Pada grafik dengan kecepatan 3 m/s memiliki *drying rate* paling besar dengan nilai 6,7295 %/menit, diikuti dengan kecepatan 2,5 m/s dengan nilai 5,0549 %/menit dan 2 m/s dengan nilai 3,6099 %/menit. Pada tujuh menit pertama untuk masing-masing variasi kecepatan inlet memperlihatkan *drying rate* yang signifikan, tetapi setelah menit sebelas perubahan *drying rate* cenderung konstan.

Perbedaan laju *drying rate* dengan variasi kecepatan inlet disebabkan karena perbedaan antara laju perpindahan massa yang terjadi pada batubara. Kecepatan yang lebih tinggi akan memiliki laju perpindahan massa yang lebih besar sehingga akan mempunyai *drying rate* yang besar pula. Sementara untuk penurunan *drying rate* disebabkan oleh *moisture* yang tersisa di batubara tersisa hanya *moisture* terikat sehingga laju pengeringan batubara menjadi lebih kecil.

Grafik *drying rate* pada eksperimen ini diperoleh dari data perbandingan antara sampel basah dan sampel kering yang telah dikeringkan melalui oven. Sehingga grafik yang diperoleh merupakan data hasil penimbangan. Grafik ini bertujuan untuk mengetahui besarnya massa uap air yang dilepaskan dari permukaan batubara tiap satuan waktu.

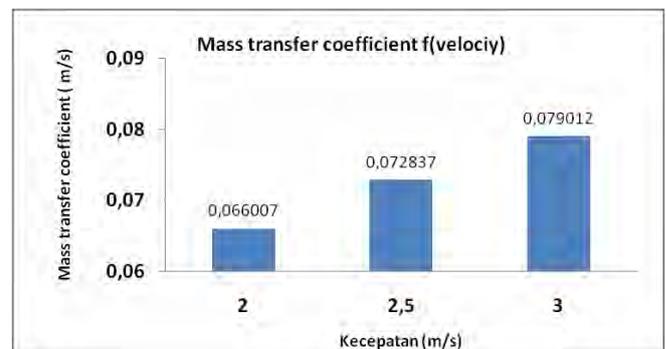
F. Pengaruh Kecepatan inlet Terhadap Selisih Humidity Ratio ($\Delta\omega$)



Gambar 12. Pengaruh kecepatan inlet terhadap Selisih Humidity Ratio ($\Delta\omega$)

Humidity ratio massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Pada gambar 12 menunjukkan besarnya nilai selisih *humidity ratio* ($\Delta\omega$) antara *humidity ratio* tiap waktu dengan *humidity ratio* udara pengering. Pada gambar dapat dilihat nilai $\Delta\omega$ memiliki *trendline* menurun. Pada 5 menit pertama diketahui nilai $\Delta\omega$ pada kecepatan inlet 3 m/s memiliki nilai yang lebih tinggi daripada variasi sudut lainnya. Pada menit 1 kecepatan inlet 2 m/s mempunyai nilai $\Delta\omega$ sebesar 10,752 gr/kg udara kering. Untuk kecepatan inlet 2,5 m/s dan kecepatan inlet 3 m/s, nilai $\Delta\omega$ sebesar 12,964 gr/kg udara kering dan 13,015 gr/kg udara kering.

G. Pengaruh Kecepatan inlet Terhadap Koefisien Perpindahan Massa



Gambar 13. Pengaruh kecepatan inlet terhadap koefisien perpindahan massa

Pada gambar 13 adalah menunjukkan koefisien perpindahan massa tiap variasi kecepatan, *histogram* dari gambar di atas terlihat naik seiring dengan pertambahan nilai dari kecepatan inlet udara pengering. Nilai koefisien perpindahan massa pada kecepatan inlet 2 m/s sebesar 0,66007 m/s, kecepatan inlet 2,5 m/s sebesar 0,072837 m/s dan kecepatan inlet 3 m/s sebesar 0,079012 m/s. Hal ini dikarenakan pengaruh kecepatan yang lebih tinggi pada variasi tersebut.

Kecepatan berhubung langsung dengan *Reynold number*, semakin tinggi nilai *Reynold Number* maka nilai *Sherwood Number* semakin tinggi (Sh). Nilai *Sherwood Number* semakin naik maka koefisien perpindahan massa konveksi semakin naik pula.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan dalam menguji alat *swirling fluidized bed coal dryer* dengan variasi kecepatan *inlet* udara pengering dapat disimpulkan:

1. Dari ketiga variasi kecepatan, kecepatan 3 m/s memiliki hasil temperatur keluar *chamber* paling rendah di awal pengeringan dengan nilai pada menit 1 sebesar 33,5 °C dan *relative humidity* tertinggi dengan nilai 62,5 %, tetapi memiliki temperatur keluar *chamber* paling tinggi di akhir pengeringan dengan nilai pada menit 31 sebesar 39,8 °C dan *relative humidity* terendah dengan nilai 20,0%. Penurunan temperatur dan nilai *relative humidity* tinggi dikarenakan massa air yang keluar dari batubara lebih banyak daripada kecepatan 2,5 m/s dan 2 m/s.
2. Dengan *moisture content* batubara awal sebesar 33,303 %, kecepatan 3 m/s dapat mengurangi *moisture content* batubara pada akhir pengeringan berturut-turut sebesar 3,025 %, kecepatan 2,5 m/s mampu mengurangi *moisture content* dari 36,383 % menjadi 8,569 %, kecepatan 2 m/s mampu mengurangi *moisture content* dari 34,804 % menjadi 15,357 %.
3. Dari ketiga variasi kecepatan, pada menit 1 kecepatan 3 m/s memiliki nilai *drying rate* sebesar 6,7295 %/menit. Kecepatan 2,5 m/s memiliki nilai *drying rate* sebesar 5,0549 %/menit. Kecepatan 2 m/s memiliki nilai *drying rate* sebesar 3,6099 %/menit.
4. Dari ketiga variasi kecepatan, pada menit 1 kecepatan 3 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 13,0150 g/kg. Kecepatan 2,5 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 12,9640 g/kg. Kecepatan 2 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 10,7520 g/kg.
5. Dari ketiga variasi kecepatan, kecepatan 3 m/s memiliki koefisien perpindahan massa sebesar 0,079012 m/s, koefisien perpindahan massa pada kecepatan 2,5 m/s sebesar 0,072837 m/s dan koefisien perpindahan massa pada kecepatan 2 m/s sebesar 0,066007 m/s.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberi masukan dan bimbingan selama proses pengerjaan tugas akhir ini. Dan juga penulis berterima kasih pula terhadap Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT., Dr. Bambang Arip Dwiyantoro, ST, M.Eng., dan Ir. Kadarisman selaku dosen penguji tugas akhir, atas masukan dan saran terhadap tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/72870-inspection-carried-out-in-boiler-economizer>
- [2] <http://www.deryckgibson.com/energy-services/babcock>
- [3] Pengfei Zhao, Yuemin Zhao, Zhenfu Luo, Zengqiang Chen, Chenlong Duan, Shulei Song. 2014. *Effect of Operating Conditions on Drying Chinese Lignite in a Vibration Fluidized Bed*. School of Electric Power Engineering, China University of Mining and Technology, School of Chemical Engineering and

Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou. China.

- [4] Incropera, Frank P., DeWitt, Bergman, Lavine. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- [5] Stoecker, Wilbert F., Jones. 1982. *Refrigeration and Air Conditioning, 2nd Edition*. McGraw-Hill Inc. Urbana-Champaign.

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH KECEPATAN INLET
DRYING CHAMBER TERHADAP LAJU PENGERINGAN
BATUBARA *LOW-RANK* PADA *SWIRLING FLUIDIZED
BED DRYER***

DOSEN PEMBIMBING:

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

Stevanus Franciscus Wahyudi N.

2110100092

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

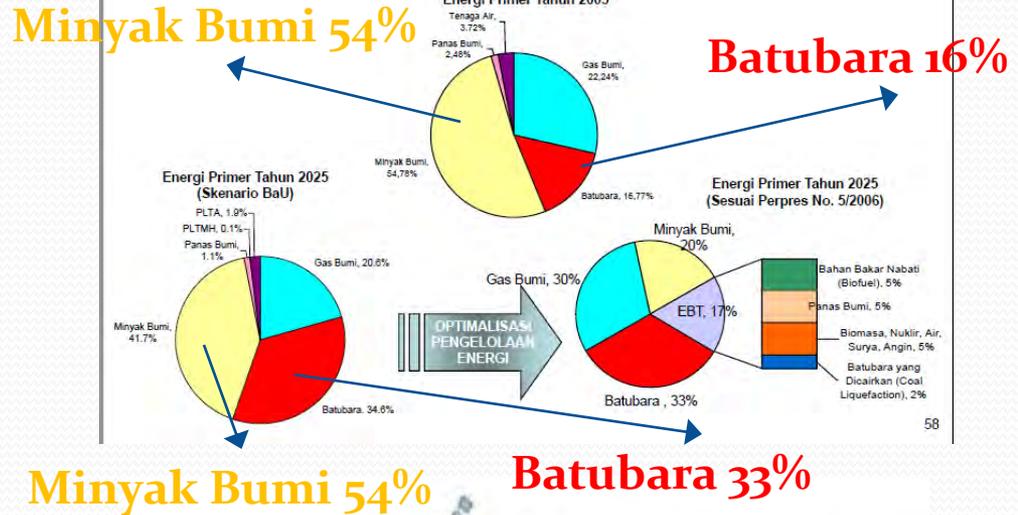


Latar Belakang

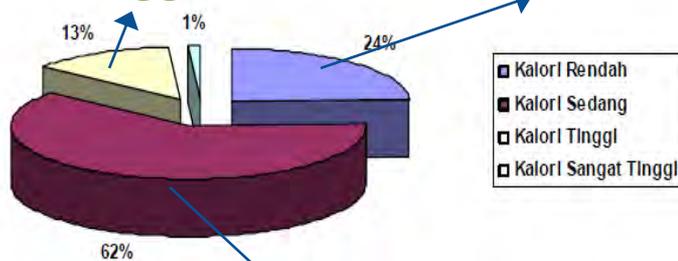
PRODUKSI, EKSPOR DAN KONSUMSI BATUBARA 2000-2012

no.	Tahun	Produksi (ton)	Ekspor (ton)	Konsumsi
1	2000	77040185	58460492	18579693
2	2001	92540460	65281086	27259374
3	2002	103329093	74177926	29151167
4	2003	114278000	85680621	28596489
5	2004	132352025	93758806	36081734
6	2005	152722438	110789700	41350736
7	2006	193761311	143632865	48995069
8	2007	216946999	163000000	61470000
9	2008	240249068	191430218	48926681
10	2009	256181000	198366000	55790000
11	2010	275164196	208000000	67000000
12	2011	290000000	209100000	65000000
13	2012	386000000	304000000	67300000

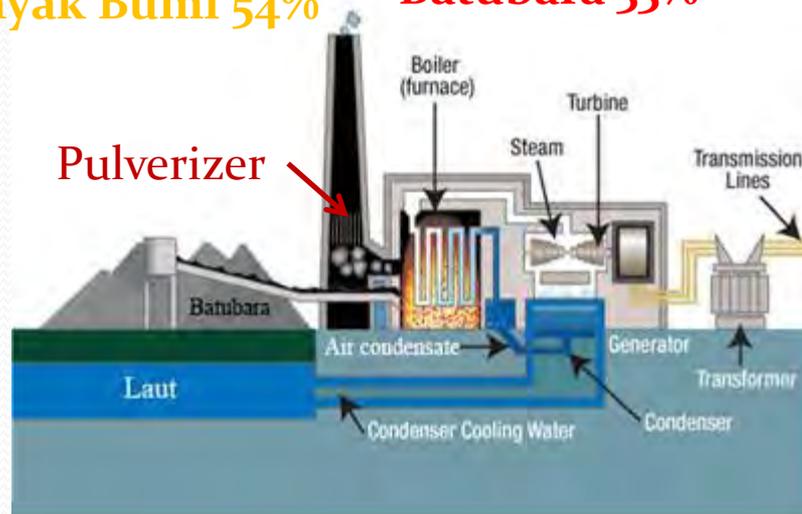
LAMPIRAN N SASARAN BAURAN ENERGI PRIMER NASIONAL 2025 Sesuai Perpres No. 5/2006



Kalori Tinggi 13% Kalori Rendah 24%



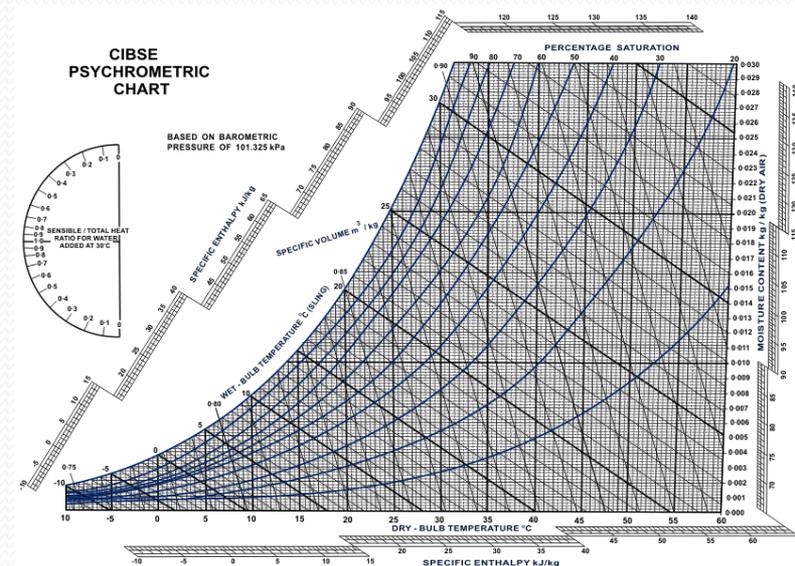
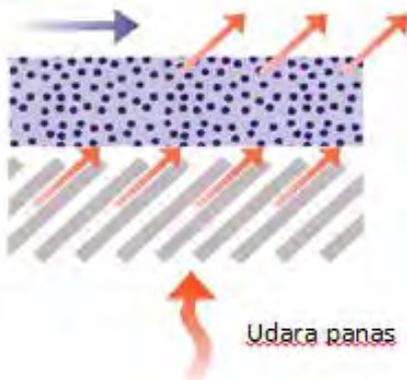
Kalori Sedang 62%



Tujuan Penelitian

- Mengetahui pengaruh **variasi kecepatan air heater** terhadap karakteristik laju pengeringan dan moisture content pada batubara dengan *drying chamber* tipe *swirling fluidized bed*.
- Mengetahui ratio humidity, temperatur dry bulb dan relative humidity pada **psychrometric chart** seiring berjalannya proses pengeringan.

Arah gerak Batubara



Penelitian terdahulu

Effect of Operating Conditions on drying of Chinese Lignite in a vibration fluidized bed

Peng Fei Zhao (2014)

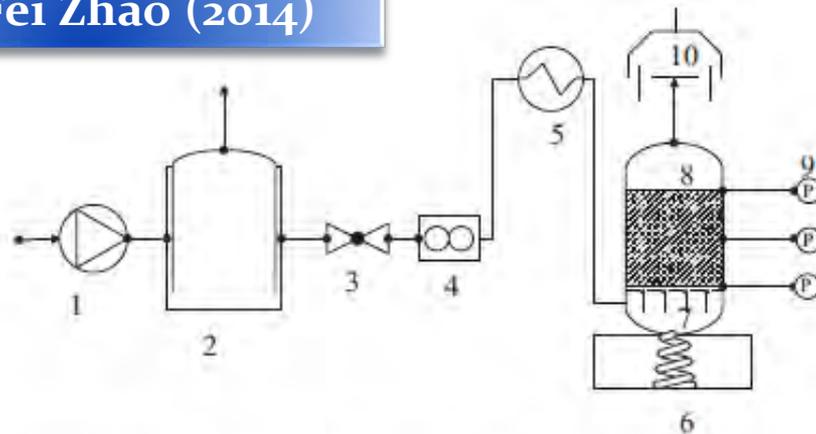
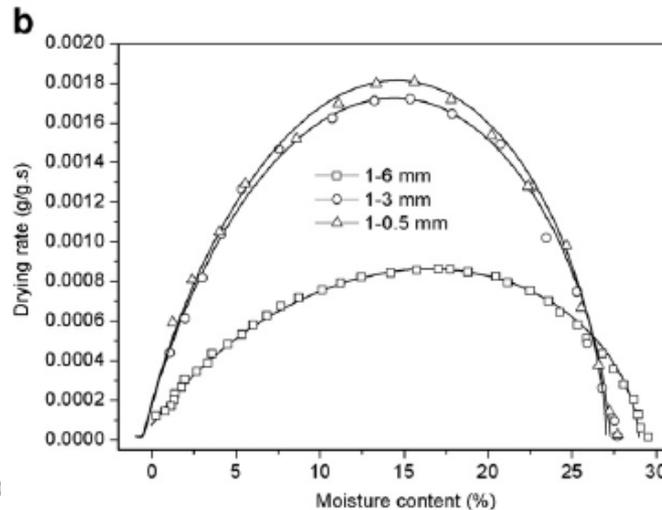
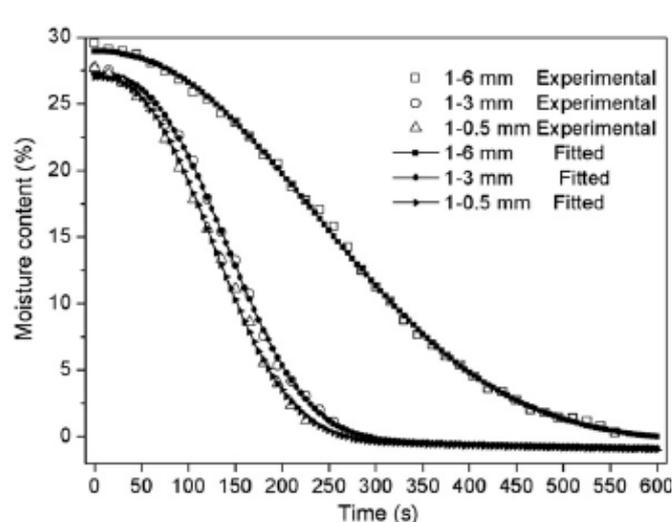


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus. (1) Gas blower; (2) tank; (3) rotameter; (4) valve; (5) electric heater; (6) vibration inductor; (7) air distributor; (8) fluidized bed; (9) manometer; (10) bag filter

- Drying characteristics for various air velocity (particle size: 1–3 mm; bed height: 40mm; inlet air temperatures: 160 °C; frequency: 30Hz; amplitude: 3mm)
- (a):moisture content vs. time; and (b) drying rate curves.

Pengaruh Ukuran Partikel



Hasil yang didapatkan adalah dengan ukuran partikel terkecil (0,5 – 1mm) mempunyai drying rate yang terbesar tetapi pada ukuran partikel terbesar (1-6mm) mempunyai drying rate terkecil

Penelitian terdahulu

Effect of Operating Conditions on drying of Chinese Lignite in a vibration fluidized bed

Peng Fei Zhao (2014)

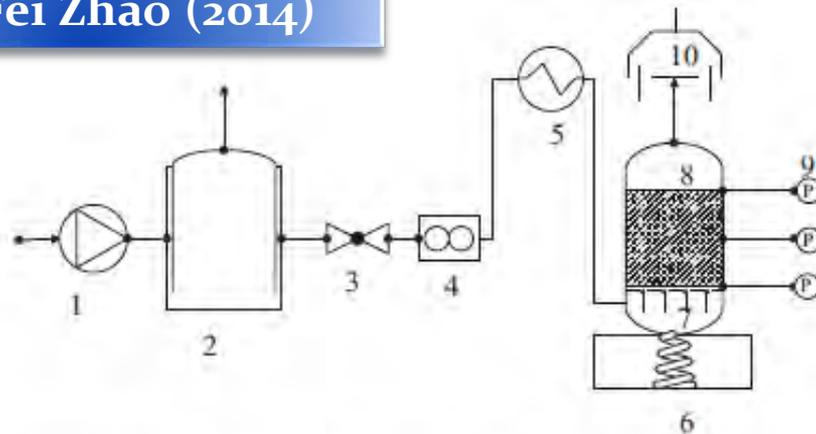
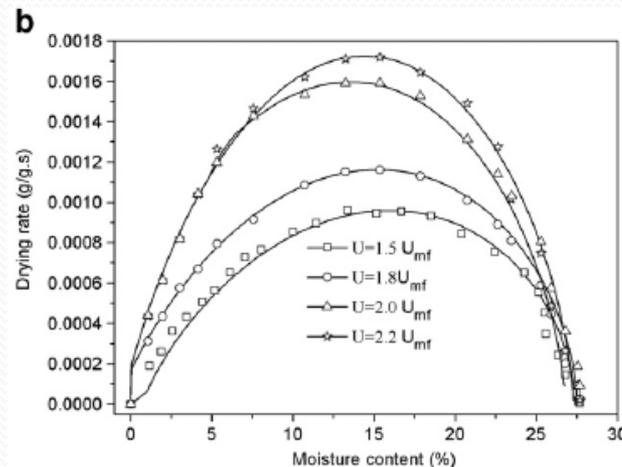
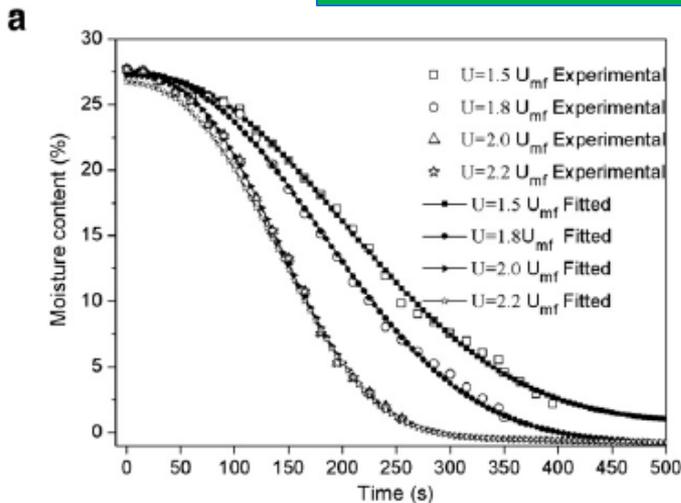


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus. (1) Gas blower; (2) tank; (3) rotameter; (4) valve; (5) electric heater; (6) vibration inductor; (7) air distributor; (8) fluidized bed; (9) manometer; (10) bag filter

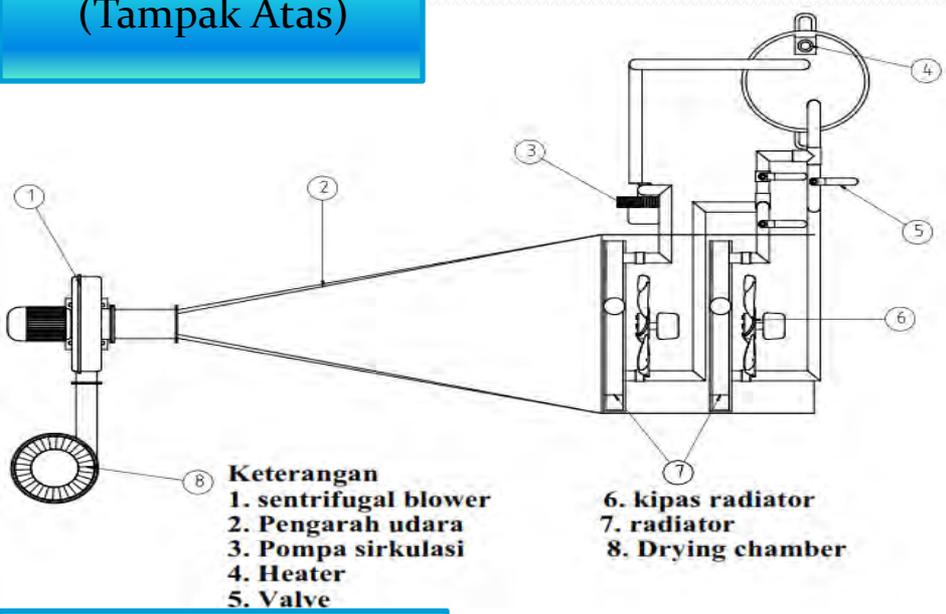
- Drying characteristics for various air velocity (particle size: 1–3 mm; bed height: 40mm; inlet air temperatures: 160 °C; frequency: 30Hz; amplitude: 3mm)
- (a): moisture content vs. time; and (b) drying rate curves.

Pengaruh Kecepatan Inlet

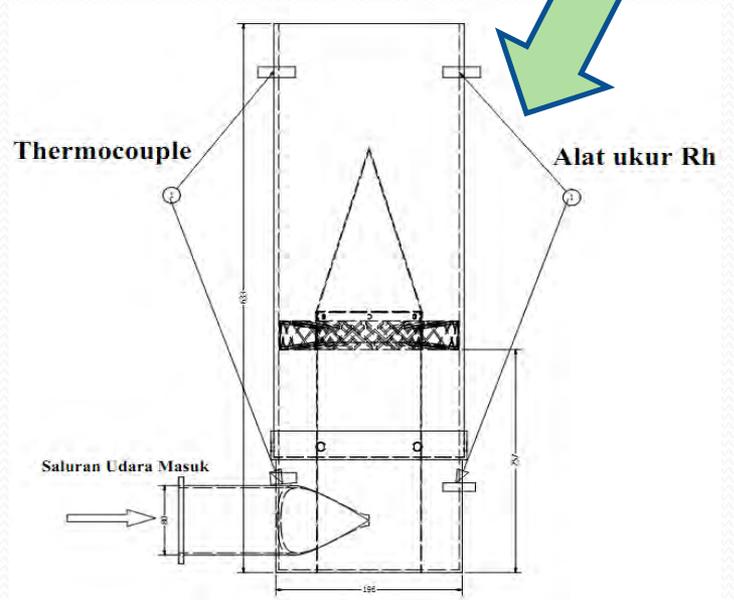
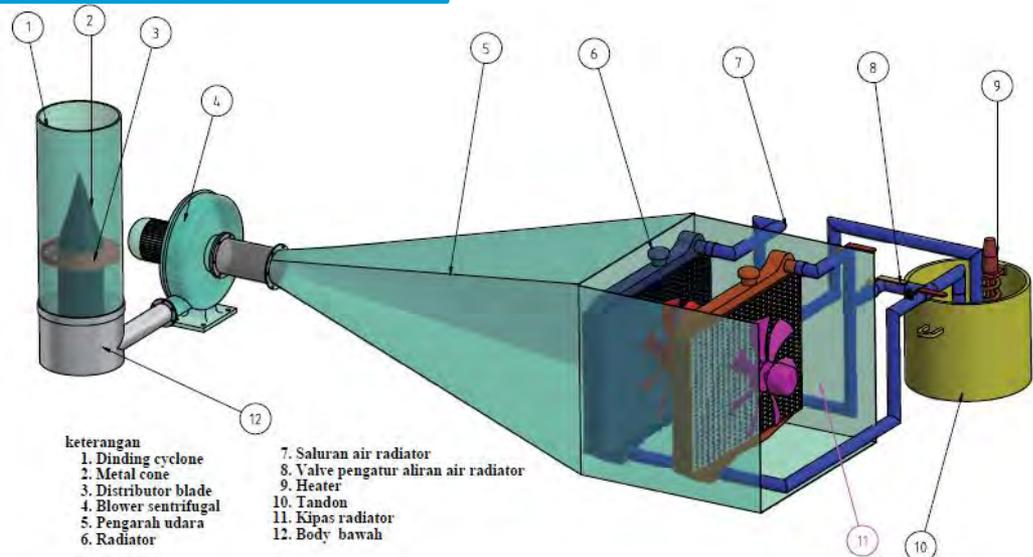


Hasil yang didapatkan adalah kecepatan terkecil ($1,5 U_{mf}$) mempunyai drying rate yang terkecil tetapi pada kecepatan terbesar ($2,2 U_{mf}$) mempunyai drying rate yang terbesar.

Skema Peralatan 2D (Tampak Atas)

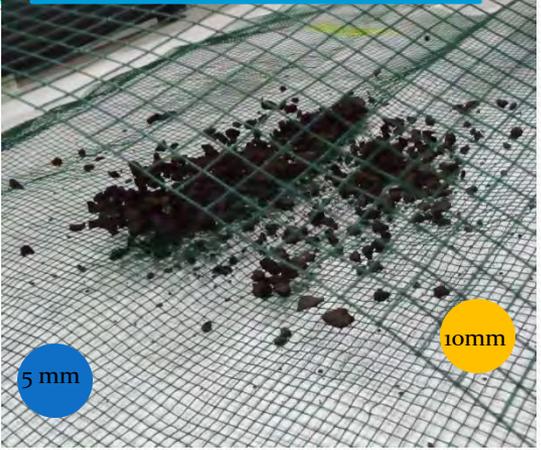


Skema Peralatan 3D



Metodologi Penelitian

Pengayakan Batubara



Penimbangan Batubara



Setting T awal dengan Thermocontrol



Proses Pemanasan Air dan Udara



Menyalakan Blower dan Mengatur Kecepatan Inlet



Pengukuran Kecepatan Inlet dengan Anemometer



Proses Pengeringan



Pembacaan Rh dan T out



Pengambilan Sample



Penimbangan Sample
(m basah)



Penimbangan m kering

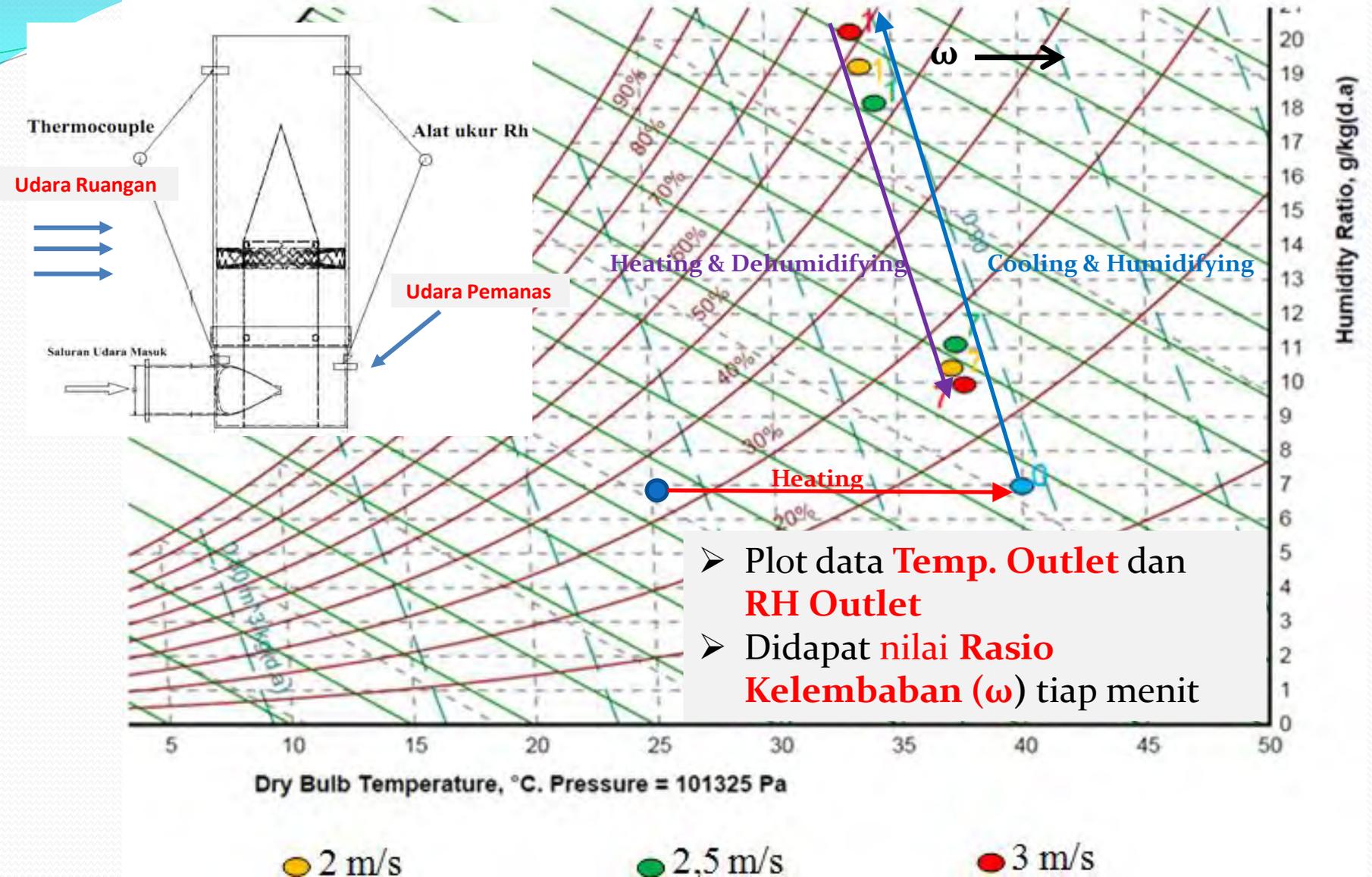


Proses Pengovenan

Memvariasikan Kecepatan dengan
Mengatur Voltage Regulator



Analisa dan Pembahasan



- Plot data **Temp. Outlet** dan **RH Outlet**
- Didapat **nilai Rasio Kelembaban (ω)** tiap menit

● 2 m/s

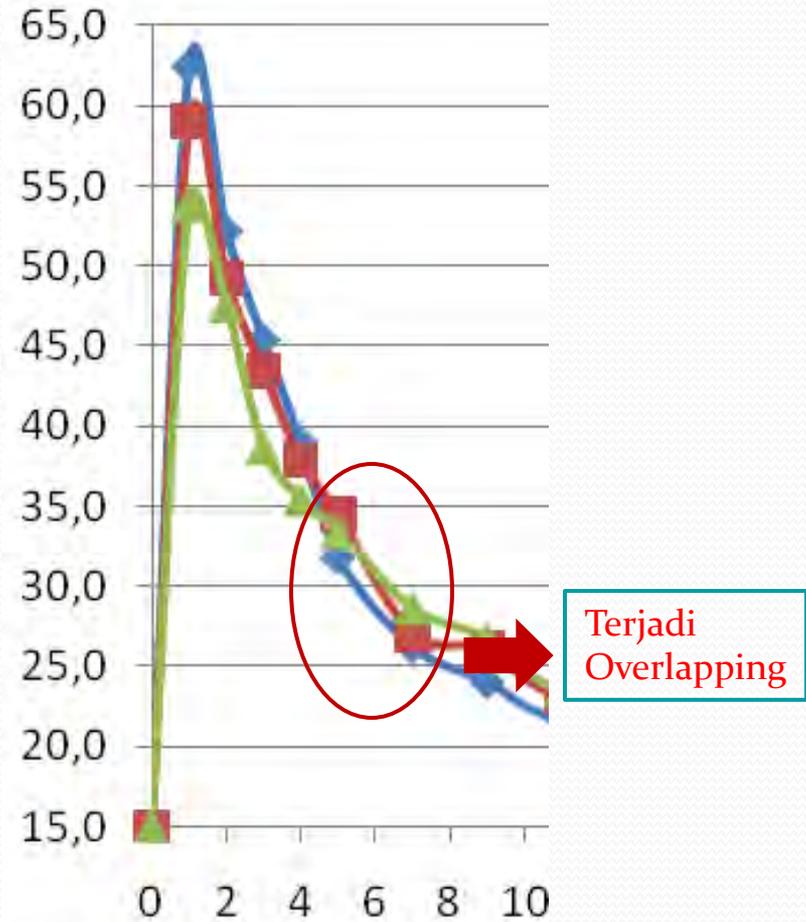
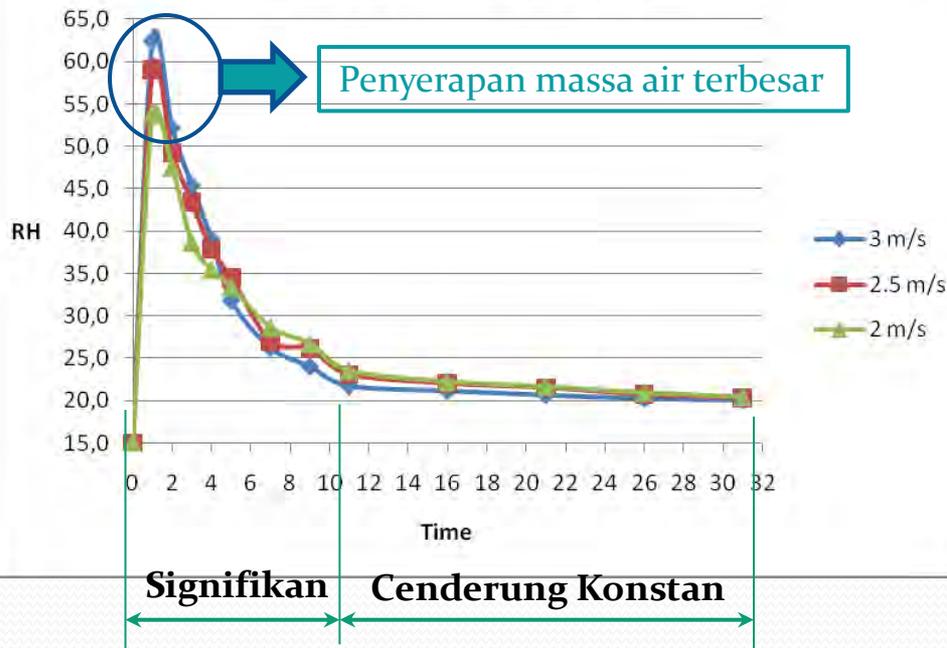
● 2,5 m/s

● 3 m/s

Plot Proses Pengeringan pada Psychrometric Chart

Analisa dan Pembahasan

Relative Humidity vs Time



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

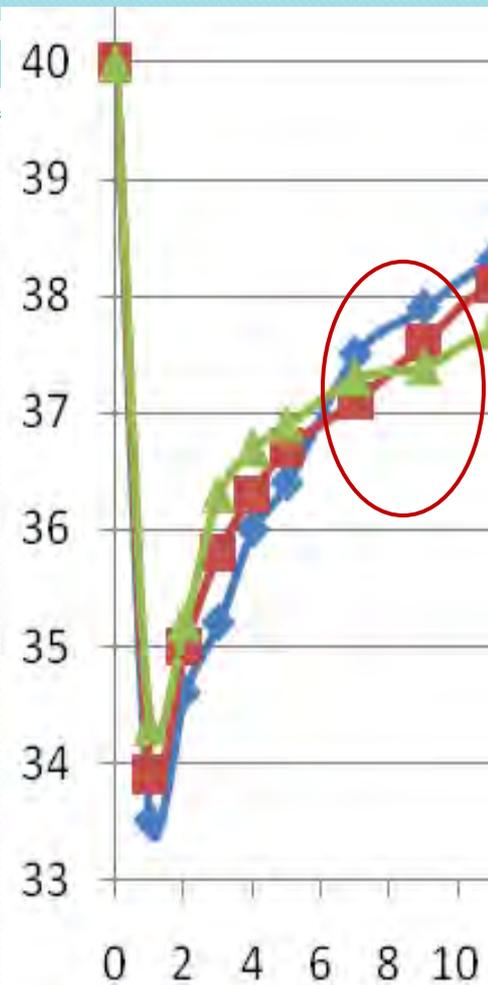
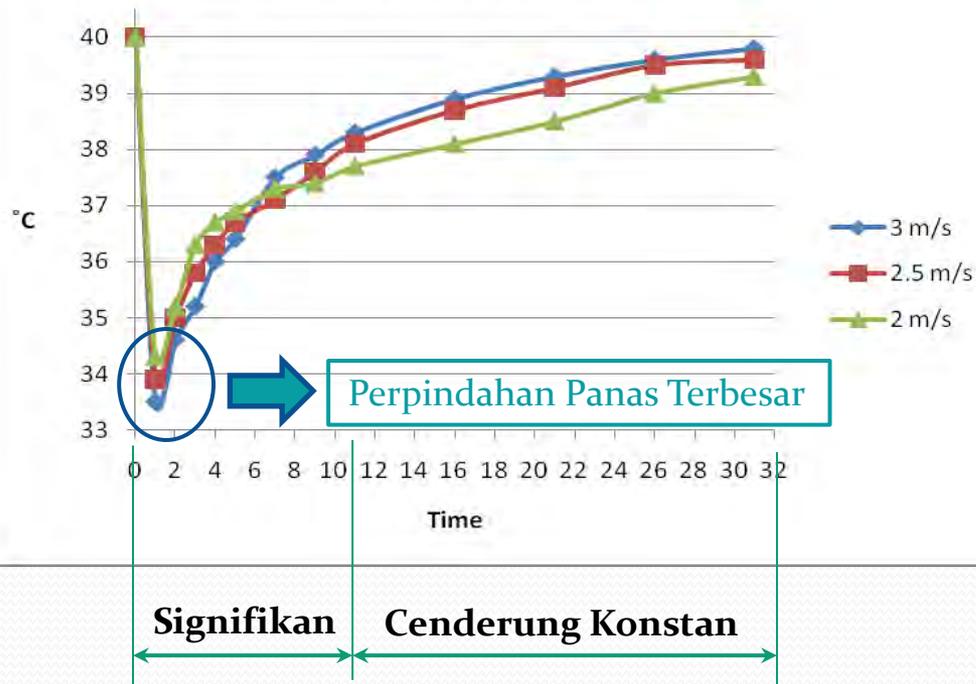
$$Sh = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}$$

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

$$n_A = h_m \cdot A \cdot (C_{A,s} - C_{A,\infty})$$

- Pada menit 5 Rh dengan v 3 m/s overlap dengan v 2,5 dan 2 m/s
- Pada menit 7 Rh dengan v 2,5 m/s overlap dengan v 2 m/s
- Overlap Rh lebih cepat terjadi pada kecepatan 3 m/s

Temperature Out vs Time



Terjadi Overlapping

- Pada menit 7 Temp dengan v 3 m/s overlap dengan v 2,5 dan 2 m/s
- Pada menit 9 Temp dengan v 2,5 m/s overlap dengan v 2 m/s
- Overlap Temp lebih cepat terjadi pada kecepatan 3 m/s

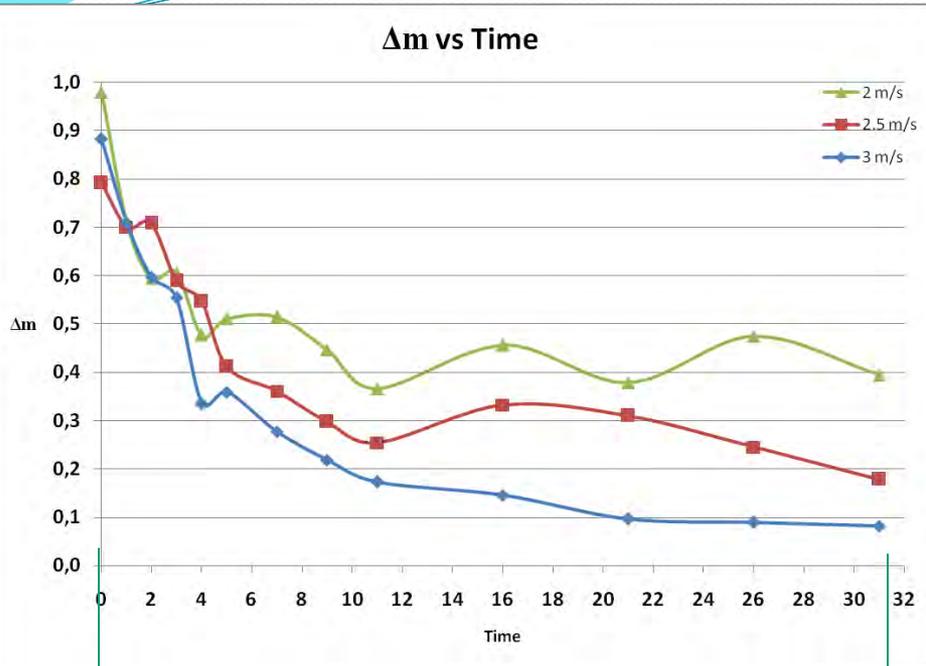
$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}$$

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

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{inf})$$

Analisa dan Pembahasan



Trendline Menurun dengan Δ mengecil

Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	M.Uap air (g)
2,3442	1,4616	0,8826
2,2936	1,5844	0,7092
2,3642	1,7669	0,5973
2,6928	2,1395	0,5533
2,0268	1,6906	0,3362
2,6832	2,3241	0,3591
2,5614	2,2842	0,2772
2,5234	2,3050	0,2184
2,4873	2,3141	0,1732
2,4972	2,3518	0,1454
2,0214	1,9249	0,0965
2,3605	2,2710	0,0895
2,7103	2,6283	0,0820



$$m_{uapair}(\Delta m) = m_{basah} - m_{kering}$$

Berat basah



Berat kering

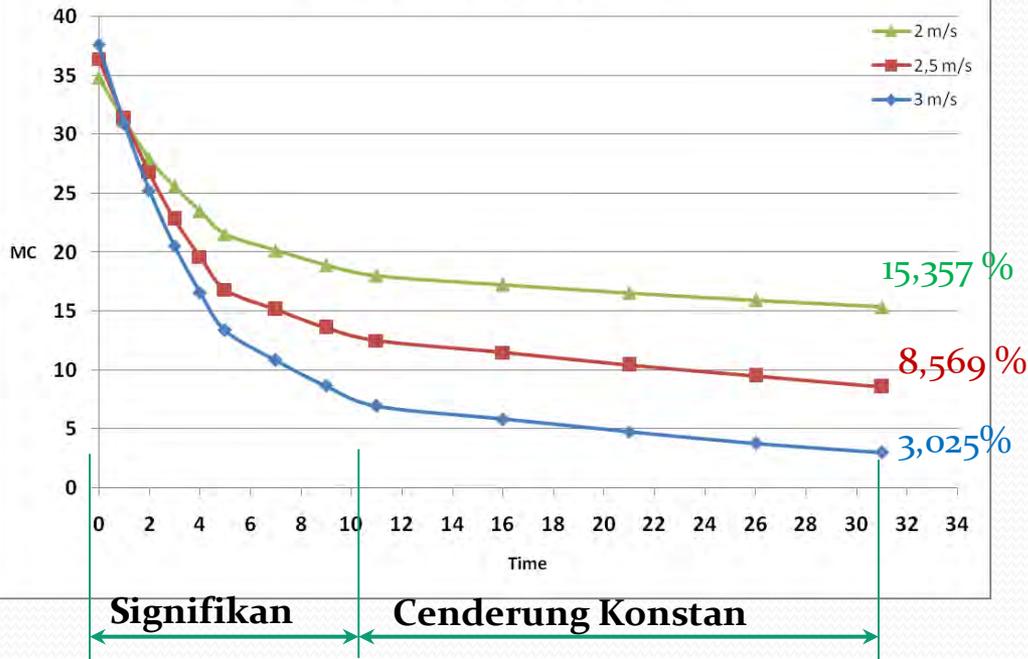


- ❖ Pengambilan sampel berat basah batubara memiliki berat yang berkisar antara $\pm 2 - 3$ gram
- ❖ Selisih berat basah dan berat kering batubara **semakin mengecil** seiring berjalan pengeringan

Analisa Uap Air Sisi Batubara

Moisture Content 3 m/s

Moisture Content vs Time



Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	M.Uap air (g)	MC (%)
2,3442	1,4616	0,8826	37,650
2,2936	1,5844	0,7092	30,921
2,3642	1,7669	0,5973	25,264
2,6928	2,1395	0,5533	20,547
2,0268	1,6906	0,3362	16,586
2,6832	2,3241	0,3591	13,383
2,5614	2,2842	0,2772	10,822
2,5234	2,3050	0,2184	8,655
2,4873	2,3141	0,1732	6,963
2,4972	2,3518	0,1454	5,823
2,0214	1,9249	0,0965	4,774
2,3605	2,2710	0,0895	3,792
2,7103	2,6283	0,0820	3,025

Moisture Content menggambarkan kandungan uap air yang berada didalam batubara.

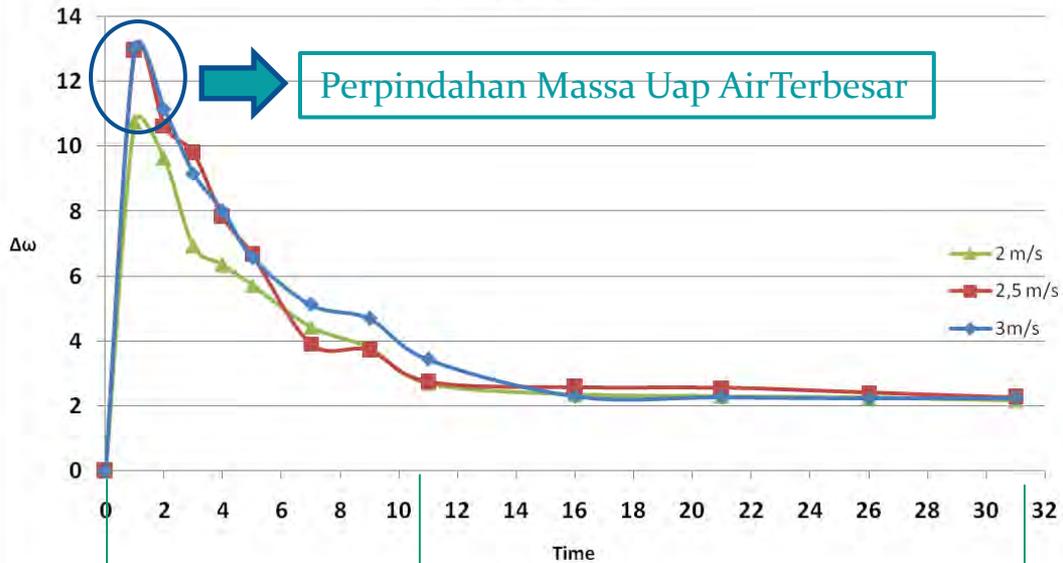
- Penurunan Moisture Content **paling cepat** terjadi pada **Kecepatan 3 m/s**
- Variasi **kecepatan 3 m/s** adalah yang paling baik

$$MC = \frac{m_{basah} - m_{kering}}{m_{basah}} \times 100\%$$



Analisa Uap Air Sisi Udara

$\Delta\omega$ vs Time



Signifikan

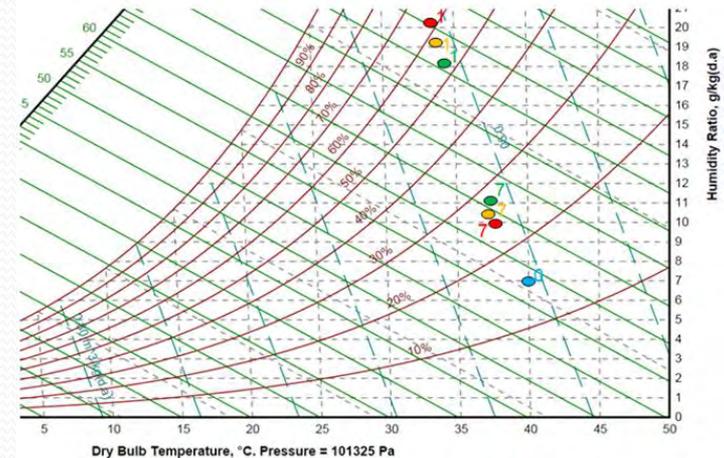
Cenderung Konstan

Humidity ratio menggambarkan satuan massa uap air tiap satuan massa udara kering.

$$\Delta\omega = \omega_{outlet} - \omega_{inlet}$$

$$\omega_{ud} = \frac{m_{uap\ air}}{m_{ud}}$$

ω udara	ω Inlet	Massa Udara	$\Delta\omega$
(g/kg)	(g/kg)	(kg)	(g/kg)
6,901	6,901	3,2327	0,0000
19,916	6,901	3,2327	13,0150
18,058	6,901	3,2327	11,1570
16,064	6,901	3,2327	9,1630
14,932	6,901	3,2327	8,0310
13,480	6,901	3,2327	6,5790
12,021	6,901	6,4654	5,1200
11,600	6,901	6,4654	4,6990
10,336	6,901	6,4654	3,4350
9,186	6,901	16,1634	2,2850
9,162	6,901	16,1634	2,2610
9,129	6,901	16,1634	2,2280
9,136	6,901	16,1634	2,2350



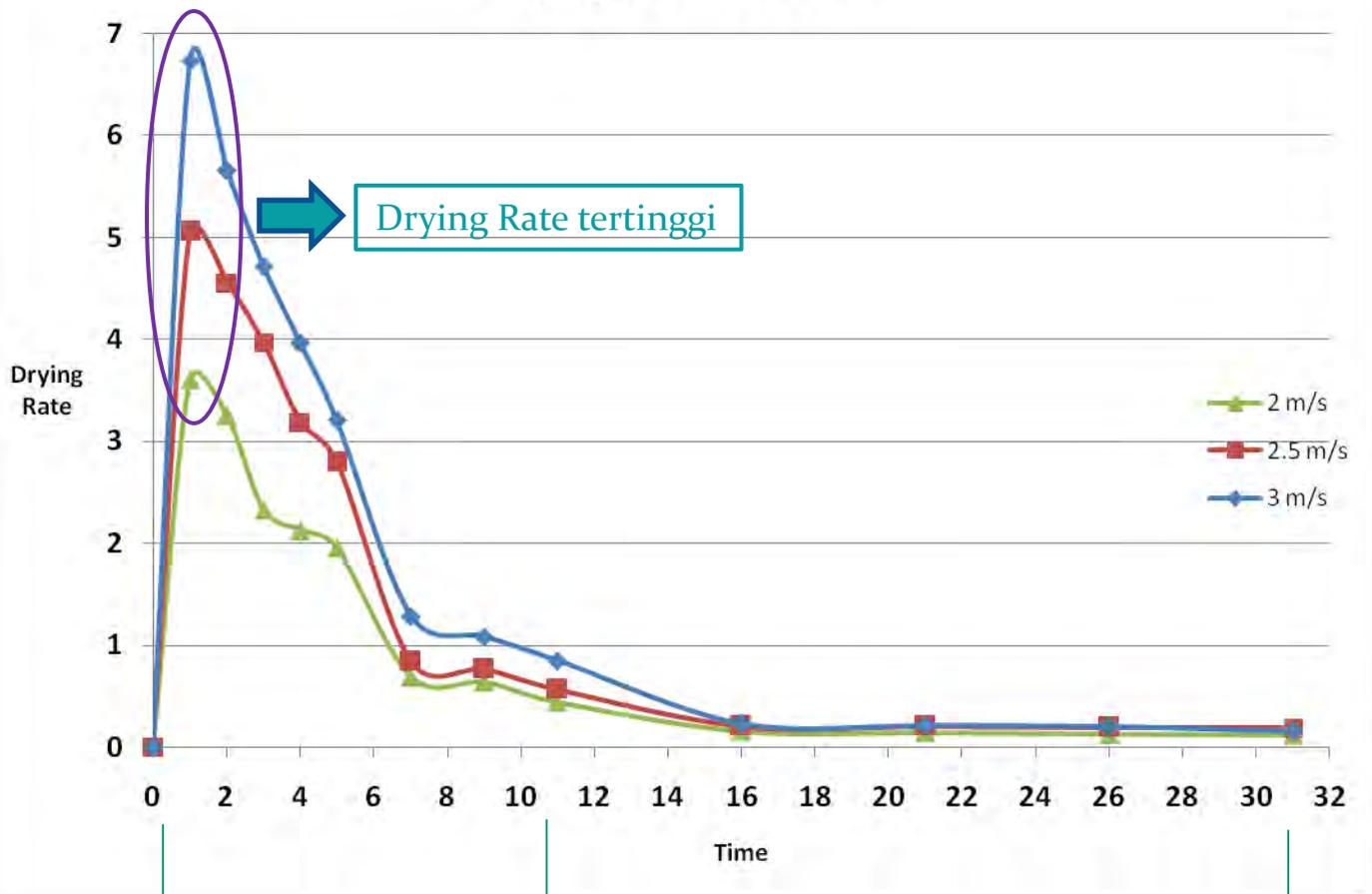
● 2 m/s

● 2,5 m/s

● 3 m/s

Analisa dan Pembahasan

Drying Rate vs Time

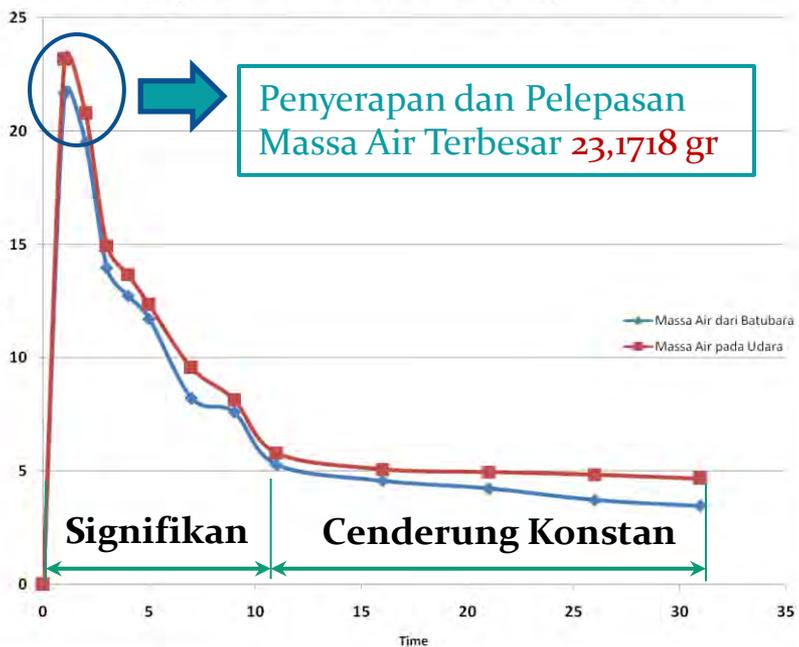


MC (%)	Drying Rate (%/menit)
37,650	0,0000
30,921	6,7295
25,264	5,6565
20,547	4,7170
16,586	3,9616
13,383	3,2026
10,822	1,2805
8,655	1,0836
6,963	0,8458
5,823	0,2282
4,774	0,2097
3,792	0,1965
3,025	0,1532

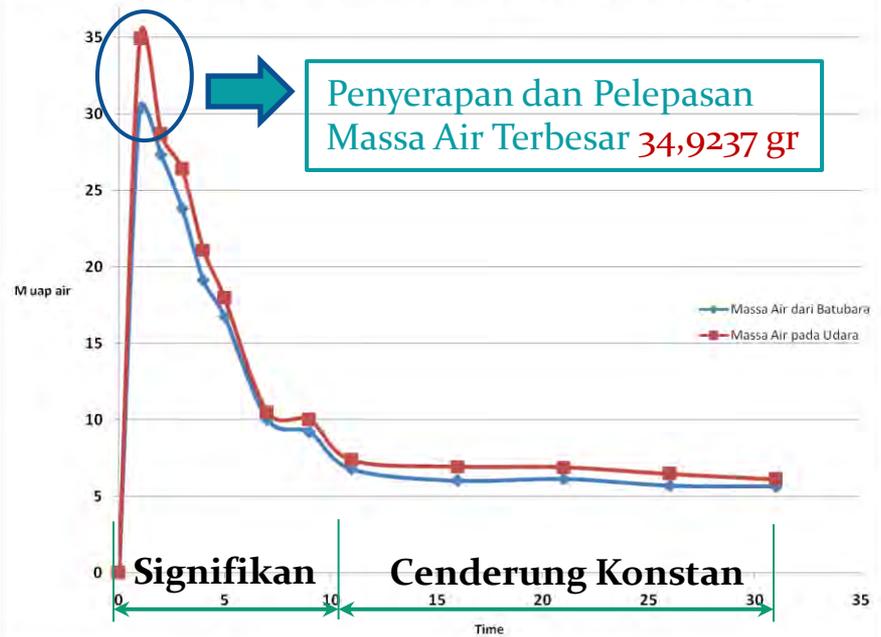
$$DryingRate = \frac{\Delta MC}{\Delta t}$$

➤ **Kecepatan 3 m/s** memiliki kenaikan drying rate **tertinggi** pada menit awal

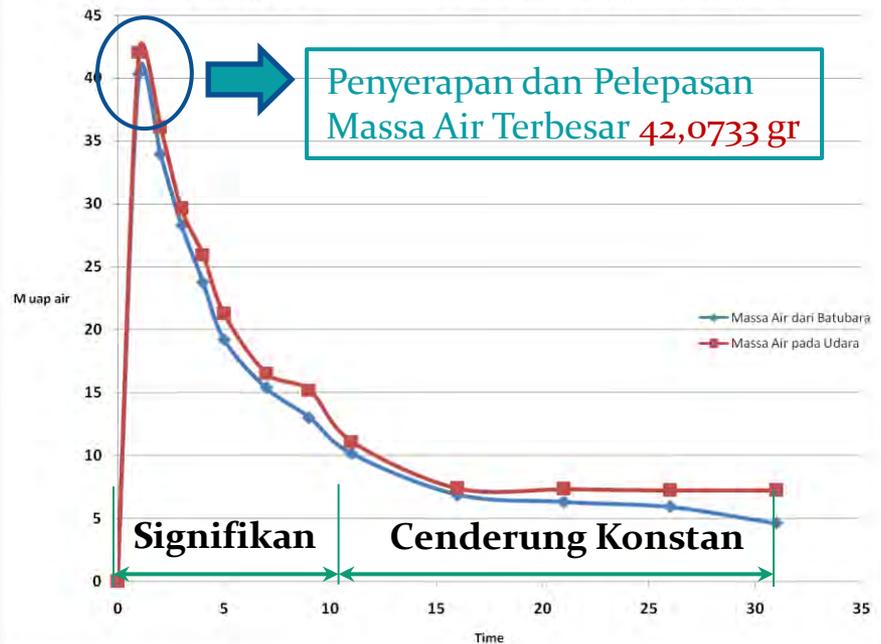
Grafik M uap air dari batubara dan udara Kecepatan 2 m/s



Grafik M uap air dari batubara dan udara Kecepatan 2,5 m/s



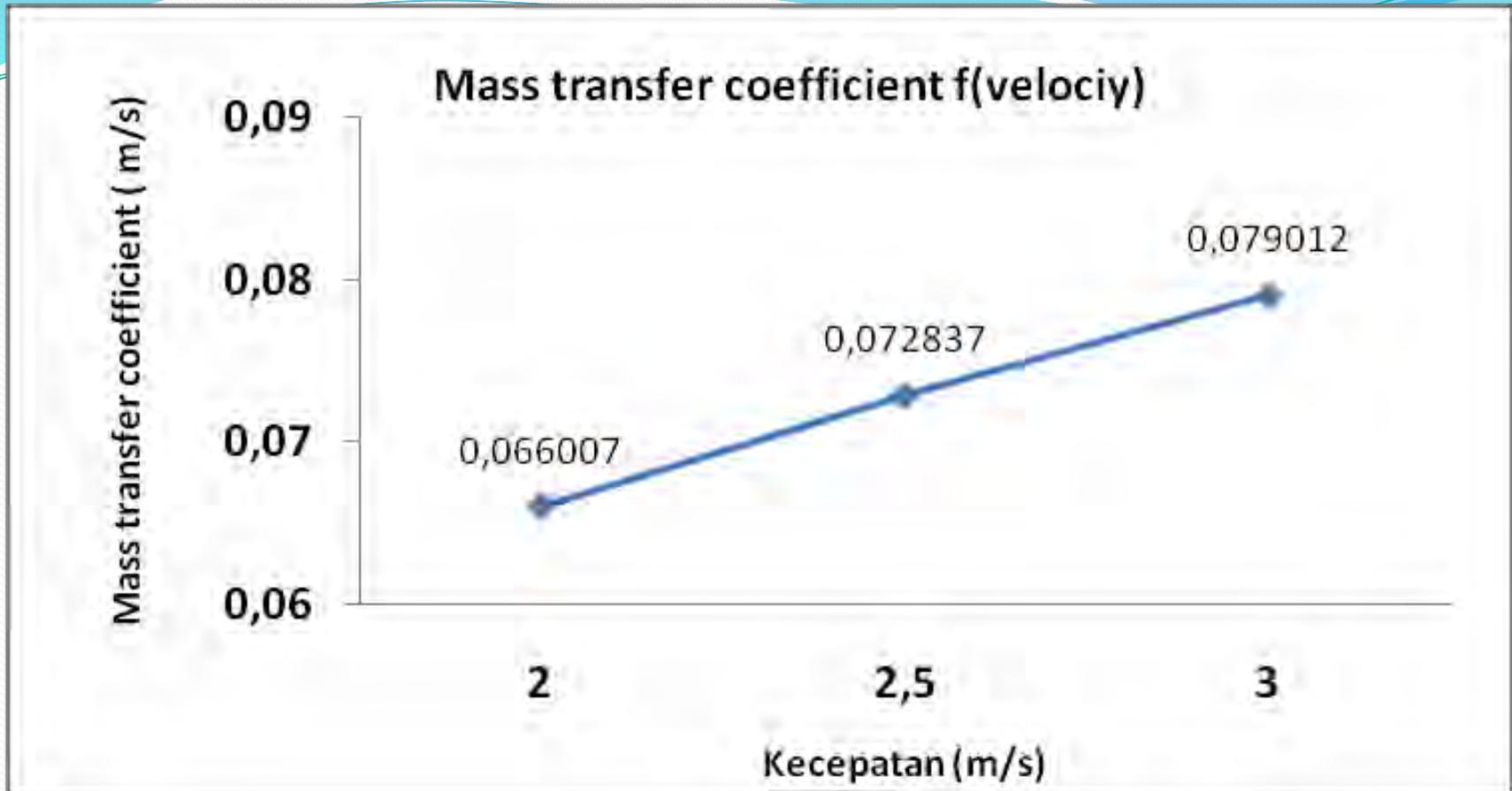
Grafik M uap air dari batubara dan udara Kecepatan 3 m/s



$$\omega_{ud} = \frac{m_{uap\ air}}{m_{ud}}$$

- Penyerapan dan pelepasan uap air **paling besar** pada menit awal terjadi pada **Kecepatan 3 m/s**
- Variasi **kecepatan 3 m/s** mengeringkan batubara paling cepat

Analisa dan Pembahasan



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

$$Sh = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}$$

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

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

- Kecepatan 3 m/s memiliki koefisien dan laju perpindahan massa terbesar dibanding kecepatan 2,5 m/s dan 2 m/s
- $h_m \text{ 3 m/s} > \text{2,5 m/s} > \text{2 m/s}$

Kesimpulan

1. Dari ketiga variasi kecepatan, kecepatan 3 m/s memiliki hasil temperatur keluar *chamber* paling rendah di awal pengeringan dengan nilai pada menit 1 sebesar 33,5 °C dan *relative humidity* tertinggi dengan nilai 62,5 %, tetapi memiliki temperatur keluar *chamber* paling tinggi di akhir pengeringan dengan nilai pada menit 31 sebesar 39,8 °C dan *relative humidity* terendah dengan nilai 20,0%. Penurunan temperatur dan nilai *relative humidity* tinggi dikarenakan massa air yang keluar dari batubara lebih banyak daripada kecepatan 2,5 m/s dan 2 m/s.
2. Dengan *moisture content* batubara awal sebesar 37,650%, kecepatan 3 m/s, *moisture content* batubara pada akhir pengeringan berturut-turut sebesar 3,025. Kecepatan 3 m/s memiliki penurunan *moisture content* terbesar, dan *drying rate* terbesar.
3. Dari ketiga variasi kecepatan, pada menit 1 kecepatan 3 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 13,0150 g/kg. Kecepatan 2,5 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 12,9640 g/kg. Kecepatan 2 m/s memiliki nilai selisih *humidity ratio* sebesar 10,75200 g/kg. Kecepatan 3 m/s memiliki selisih *humidity ratio* terbesar.
4. Dari ketiga variasi kecepatan, kecepatan 3 m/s memiliki koefisien perpindahan massa sebesar 0,079012 m/s, koefisien perpindahan massa pada kecepatan 2,5 m/s sebesar 0,072837 m/s dan koefisien perpindahan massa pada kecepatan 2 m/s sebesar 0,066007 m/s. Kecepatan 3 m/s memiliki koefisien perpindahan massa terbesar.



THANK

YOU

FOR

WATCHING

MY PPT