

TUGAS AKHIR - TM 141585

# STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN PENGERINGAN PADA *CYCLONE COAL DRYER* TERHADAP KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA

KUKUH RIDHO DANI HERMAWAN  
NRP 2111 100 150

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

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**TUGAS AKHIR (KONVERSI ENERGI) - TM141585**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI  
BEBAN PENGERINGAN *PADA CYCLONE  
COAL DRYER* TERHADAP KARAKTERISTIK  
PENGERINGAN BATUBARA**

**KUKUH RIDHO DANI HERMAWAN  
NRP. 2111100150**

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

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**FINAL PROJECT (ENERGY CONVERSION) - TM141585**

**EXPERIMENTAL STUDY ON  
CHARACTERISTICS OF COAL DRYING  
LOAD VARIATION IN CYCLONE COAL  
DRYER**

**KUKUH RIDHO DANI HERMAWAN**  
NRP. 2111100150

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

DEPARTMEN OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN  
PENGERINGAN PADA *CYCLONE COAL DRYER*  
TERHADAP KARAKTERISTIK PENGERINGAN  
BATUBARA**

**TUGAS AKHIR**

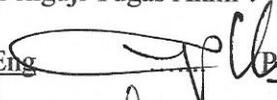
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**KUKUH RIDHO DANI HERMAWAN**

NRP. 2111 100 150

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng  (Pembimbing)  
NIP. 1965055051990031005
2. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo,  (Penguji I)  
ME
3. Ary Bachtiar K.P., ST, MT, PhD.  (Penguji II)  
NIP. 197105241997021001
4. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT  (Penguji III)  
NIP. 197301161997021001

**SURABAYA**

**JANUARI, 2017**

# **STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI BEBAN PENGERINGAN PADA *CYCLONE COAL DRYER* TERHADAP KARAKTERISTIK PENGERINGAN BATUBARA**

**Nama Mahasiswa : Kukuh Ridho Dani Hermawan**  
**NRP : 2111100150**  
**Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing: Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng**

## **ABSTRAK**

Pembangkit listrik merupakan elemen penting yang sangat dibutuhkan pada sektor industri, dimana salah satu jenis pembangkit listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pembangkit jenis ini sangat dominan menggunakan bahan bakar utama berupa batubara, dimana batubara yang dianggap mempunyai kandungan nilai kalor tertentu sesuai dengan jenisnya. Semakin tinggi nilai kalor dari batubara maka akan semakin baik untuk boiler mendapatkan efisiensi maksimal dalam proses pembakarannya, sedangkan ketersediaan batubara kebanyakan memiliki nilai kalor rendah. Maka dari itu hampir pada setiap pembangkit selalu memiliki *pulverizer* untuk memenuhi kapasitas *mill* dengan keseluruhan *pulverizer* digunakan, sehingga tidak tersedia cadangan *pulverizer* bila ada kerusakan pada salah satu *pulverizer* dan hal ini akan memberikan dampak turunya kapasitas dari produksi sistem PLTU. Untuk menghindari dampak kerugian seperti itu maka harus digunakan batubara dengan nilai kalor yang tinggi sehingga sesuai dengan spesifikasi desain boiler. Untuk meningkatkan nilai kalor batubara perlu dilakukan pengeringan untuk mengurangi kadar air dalam batubara tersebut. Teknologi *Cyclone Coal Dryer* merupakan salah satu jenis pengering batubara dengan prinsip fluidisasi dimana udara

disirkulasikan sehingga membentuk cyclone untuk mengeringkan batubara.

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan alat penelitian dalam skala laboratorium yaitu *cyclone coal dryer*. Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan sampel batubara dengan kadar air yang tinggi (low rank coal), batubara yang akan dikeringkan diletakkan pada *drying chamber* yang nantinya mendapatkan hembusan udara panas dari blower yang telah dipanaskan terlebih dahulu dengan sistem heat exchanger, dimana aliran udara panas tersebut akan melewati *blade* dengan sudut inklinasi  $20^\circ$  sehingga membentuk aliran yang mengikuti sudut *blade* tersebut. Pengambilan data eksperimen untuk *moisture content* dilakukan sebanyak 15 kali untuk setiap 1 menit, kemudian sebanyak 8 kali untuk setiap 2 menit. Percobaan dilakukan dengan memvariasikan beban pengeringan 300 gr, 500 gr, dan 700 gr. Batubara yang digunakan memiliki ukuran diameter  $\pm 6$  mm. Untuk proses terakhir mendapatkan *moisture content* sisa, dilakukan pengeringan lanjutan dengan menggunakan *oven electric* selama 180 menit dengan temperatur  $105^0$  C (standart ASTM D 5142).

Hasil yang didapatkan dari eksperimen ini yaitu *relative humidity* dan temperatur pada sisi inlet dan outlet dari *drying chamber*, dan juga massa batubara basah dan kering. Dari data tersebut akan diolah sehingga mendapatkan nilai pada sisi batubara yaitu drying rate untuk ketiga variasi beban pengeringan 300 gram, 500 gram dan 700 gram berturut-turut sebesar 3,3225 % per menit, 3,1182 % per menit, dan 2,3225 % per menit. Nilai koefisien perpindahan massa untuk beban pengeringan 300 gram sebesar 0,04828 m/s, untuk beban pengeringan 500 gram sebesar 0.03186 m/s, dan untuk beban pengeringan 700 gram sebesar 0,02167 m/s.

**Kata kunci : Fluidisasi, Cyclone Coal Dryer, Drying Rate, Diagram Psikometrik.**

# EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF COAL DRYING LOAD VARIATION IN CYCLONE COAL DRYER

**Student Name** : Kukuh Ridho Dani Hermawan  
**NRP** : 2111100150  
**Department** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Lecturer** : Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng.

## ABSTRACT

*Power plants are the most important element of industrial sector, one example of power plant is steam power plant. This type of power plant uses coal as a primary fuel, because it has a heat value correspond to its type. The higher its heat value the better for boiler to receive maximum efficiency of its burning process, however most coal has low heat value. Therefore, almost every power plant have a pulverizer to meet the requirement of mill capacity, so that if there is a damage on the pulverizer there are no reserve pulverizer and the outcome will be a decrease in capacity. To avoid any losses the use of high heat value coal so that it suits the boiler design specification. To increase the coal heat value it needs to decrease moisture content from the coal by drying it. Cyclone Coal Dryer is one of many coal drying technology that use fluidization concept where air circulated to form a cyclone for coal drying.*

*This experiment is done by using laboratory scale research equipment that is cyclone coal dryer. This research is done by using a sample of coal with a high moisture content (low rank coal), by placing the coal in a drying chamber it will receive hot air flow from the blower that had been heated with a heat exchanger system, where the hot air flow passed a blade with an inclination angle of 20° so it forms a flow that will follow the angle of the blade. The experiment data of moisture content are collected*

*from 15 times each every 1 minute, then 8 times each every 2 minutes. The experiment has variations of drying load which are 300 gr, 500 gr, and 700 gr. The coal that is use have a diameter of  $\pm 6$  mm. for the last step to get the excess moisture content, further drying is done by using an electric oven for 180 minutes with temperature of  $105^{\circ}\text{C}$  (ASTM D 5142 standard).*

*The results of this experiment are relative humidity, the inlet temperature, and the outlet temperature from the drying chamber, and also the mass of wet and dry coal. From those data the drying rate for the 3 variation of drying load 300 gr, 500 gr, and 700 gr are 3,3225 % per minute, 3,11182 % per minute, and 2,3225 % per minute respectively. The mass transfer coefficient for drying load of 300 gr is 0,04828 m/s, for dying load 500 gr is 0,03186 m/s, and for drying load 700 gr is 0,02167 m/s.*

***Key words: Fluidization, Cyclone Coal Dryer, Drying Rate, Psychometric Chart***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Beban Pengeringan pada Cyclone Coal Dryer Terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara**”. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak **Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.**, selaku dosen pembimbing yang selalu dengan sabar dan tidak henti-hentinya memberikan arahan, dukungan, motivasi, serta ilmu yang sangat berharga sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak **Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME, Dr. Bambang Sudarmanta, S.T, M.T, dan Ary Bachtiar K.P., S.T, M.T, PhD**, selaku dosen penguji seminar proposal maupun sidang Tugas Akhir yang telah memberikan saran, masukan serta kritik kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
3. Bapak **Prof. Dr. Ing. I Made Londen Batan, ME**, selaku dosen wali yang telah memberikan arahan-arahannya kepada penulis selama masa perkuliahan tahap Sarjana.
4. Seluruh **Keluarga Besarku yang tercinta**, yang senantiasa selalu memberikan doa,dukungan,motivasi, serta bantuan yang sangat membangun penulis hingga dapat menyelesaikan masa studi selama 11 Semester dan tugas akhir ini dengan sangat baik.

5. Seluruh **Dosen serta Karyawan** di Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan banyak sekali bantuan selama penulis berkuliah, baik akademis maupun non akademis.
6. **Windasari Putri Septarina** yang telah memberikan warna dalam hidup penulis disetiap momen-momen yang telah dilalui bersama-sama.
7. **Saudara-saudaraku Fossil Academy** Cubex aka Idabagus, Mbeng aka Mambang, Tentara Setan aka Jundulloh, Pantek aka Wira, Bangur aka Ngurah, Helboy aka Putra, Bocuk aka Yuko, Gabriel aka Gandung, Moh. Pariy, Johan, Gafar, dan Fadhil yang selalu bersama-sama mengalami kejahatan akademik.
8. **Saudara-saudaraku MBP Squad** Satpam aka Ario, Maling aka Nabil, Gopel aka Ardika, Botol aka Hanif, Pak aka Gayuh, Hasyim aka Hisyam, Pantek aka Esys, Santusi aka Santos, Kardus aka Firman, Gopar aka Aufar, Itg aka Itang, Prabowo aka Tito, Husen, Tj, Faizal, Roy.
9. **Seluruh teman-teman di Mauts** yang selalu memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu. Penulis mengucapkan terima kasih banyak.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut.

Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>ABSTRAK</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Manfaat Penelitian.....	7
1.5 Batasan Masalah.....	7
1.6 Sistematika Penulisan.....	8
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	9
2.1 Dasar Teori .....	9
2.1.1 Konsep Dasar <i>Cyclone Coal Dryer</i> .....	9
2.1.2 Konsep Pengeringan.....	13
2.1.3 Prinsip <i>Psychrometric Chart</i> .....	17
2.1.4 Konsep Perpindahan Panas dan Perpindahan	

Massa .....	27
2.1.5 Teknologi Pengeringan .....	33
2.2 Penelitian Terdahulu .....	35
2.2.1 Edward K Levy, dkk .....	35
2.2.2 Adi Krisnawan .....	38
<b>BAB III METODOLOGI PERCOBAAN .....</b>	<b>41</b>
3.1 Model Alat Pengeringan .....	41
3.2 Skema peralatan .....	43
3.3 Skema Peralatan Alat Ukur .....	43
3.4 Variabel Penelitian .....	44
3.5 Peralatan Penunjang Eksperimen .....	46
3.6 Metodologi Eksperimen .....	56
3.6.1 Tahap Persiapan .....	56
3.6.2 Tahap Pengambilan Data .....	58
3.6.3 Tahap Analisa Data Eksperimen .....	59
3.7 Lembar Pengambilan Data .....	59
3.8 Luaran Penelitian .....	61
3.9 <i>Flowchart</i> Eksperimen .....	62
3.9.1 <i>Flowchart</i> Pengambilan Data .....	62
3.9.2 <i>Flowchart</i> Pengolahan Data dari Batubara .....	65
3.9.3 <i>Flowchart</i> Pengolahan Data dari Udara .....	65
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>69</b>

4.1 Data Hasil Eksperimen.....	69
4.2 Analisa dan Contoh Perhitungan.....	70
4.2.1 Perhitungan Kecepatan Fluidisasi.....	70
4.2.2 Contoh Perhitungan <i>Moisture Content</i> Pada Sisi Batubara .....	70
4.2.3 Contoh Perhitungan <i>Humidity Ratio</i> Pada Sisi Udara .....	72
4.2.4 Contoh Perhitungan <i>Drying Rate</i> .....	73
4.2.5 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa.....	74
4.3 Analisa Hasil dan Pembahasan dari Sisi Batubara .....	80
4.3.1 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap <i>Moisture Content</i> Fungsi <i>Drying Time</i> .....	80
4.3.2 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap <i>Drying Rate</i> Fungsi <i>Drying Time</i> .....	81
4.4 Analisa Hasil dan Pembahasan dari Sisi Udara ...	83
4.4.1 Analisa Udara Pengering pada Diagram Psikometrik.....	83
4.4.2 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap <i>Relative Humidity</i> Fungsi <i>Drying Time</i> .....	86

4.4.3 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap Temperatur Udara Keluar	
<i>Drying Chamber</i> Fungsi <i>Drying Time</i> .....	88
4.4.4 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap Selisih <i>Humidity Ratio</i> ( $\Delta\omega$ ) Fungsi <i>Drying Time</i> .....	90
4.5 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi Beban Pengeringan 300 gram.....	91
4.6 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi Beban Pengeringan 500 gram.....	93
4.7 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi Beban Pengeringan 700 gram.....	95
4.8 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap <i>Drying Rate</i> Fungsi <i>Moisture Content</i> .....	97
4.9 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa.....	99
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	101
5.1 Kesimpulan .....	101

5.2 Saran.....	102
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>103</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>105</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>109</b>

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Persebaran potensi pembangkit listrik di Indonesia.....	1
Gambar 1.2 Distribusi persebaran batubara di Indonesia.....	2
Gambar 1.3 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).	3
Gambar 1.4 (a) <i>Pulverizer</i> (b) Skema <i>Pulverizer</i> .....	4
Gambar 2.1 Bentuk dari <i>Cyclone coal dryer</i> .....	9
Gambar 2.2 <i>Drag force</i> dan gaya berat .....	10
Gambar 2.3 Arah aliran udara pengering dalam fluidisasi .....	11
Gambar 2.4 <i>Free Body Diagram</i> .....	12
Gambar 2.5 Proses pengeringan .....	13
Gambar 2.6 Grafik fungsi <i>moisture content</i> terhadap waktu...	14
Gambar 2.7 Faktor yang mempengaruhi proses pengeringan.	16
Gambar 2.8 Proses pemanasan dan pengeringan pada <i>Psychrometric Chart</i> .....	18
Gambar 2.9 Proses pada psikrometrik chart.....	18
Gambar 2.10 Proses pemanasan .....	19
Gambar 2.11 Proses pendinginan .....	20
Gambar 2.12 Proses pelembaban .....	20
Gambar 2.13 Proses penurunan kelembapan.....	21
Gambar 2.14 Proses pemanasan dan pelembaban.....	22

Gambar 2.15 Proses pemanasan dan penurunan kelembapan	22
Gambar 2.16 Proses pendinginan dan pelembapan	23
Gambar 2.17 Proses pendinginan dan penurunan Kelembapan	24
Gambar 2.18 Proses Untuk Pengeringan Batubara	27
Gambar 2.19 <i>Rotary dryer</i>	33
Gambar 2.20 <i>Microwave dryer</i>	34
Gambar 2.21 <i>Fluidized bed dryer</i>	35
Gambar 2.22 Skema alat penelitian	36
Gambar 2.23 Grafik moisture content dalam fungsi waktu berdasarkan jenis batubara	37
Gambar 2.24 Grafik pengaruh kecepatan terhadap pengeringan batubara	38
Gambar 2.25 Skema alat penelitian	39
Gambar 2.26 Grafik perubahan <i>Relative humidity</i> pada udara pengering	39
Gambar 2.27 Grafik perbandingan <i>drying rate</i>	40
Gambar 3.1 Model peralatan pengering <i>cyclone coal dryer</i>	42
Gambar 3.2 Skema peralatan <i>cyclone coal dryer</i> (a) 2D (b) 3D	43

Gambar 3.3	(a) Posisi peletakan alat ukur (b) diagram psikometrik .....	44
Gambar 3.4	<i>Thermocouple selector</i> .....	47
Gambar 3.5	Timbangan digital .....	47
Gambar 3.6	RH meter .....	48
Gambar 3.7	<i>Digital Anemometer</i> .....	49
Gambar 3.8	<i>Thermocontrol</i> .....	50
Gambar 3.9	<i>Voltage regulator</i> .....	50
Gambar 3.10	<i>Aquades</i> .....	51
Gambar 3.11	<i>Tool kit</i> .....	52
Gambar 3.12	Ayakan ukuran 5 mm dan 10 mm .....	52
Gambar 3.13	Sarung tangan dan masker pelindung.....	53
Gambar 3.14	Cerobong buang.....	53
Gambar 3.15	Oven .....	54
Gambar 3.16	Kompur dan LPG .....	55
Gambar 3.17	<i>Heater</i> .....	55
Gambar 4.1	Diagram psikometrik untuk mencari humidity ratio % per menit .....	72
Gambar 4.2	Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>moisture content</i> fungsi <i>drying time</i> .....	80
Gambar 4.3	Pengaruh beban pengeringan terhadap	

<i>drying rate</i> fungsi <i>drying time</i> .....	81
Gambar 4.4 Proses pengeringan batubara dalam diagram psikometrik .....	86
Gambar 4.5 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>relative humidity</i> fungsi <i>drying time</i> .....	87
Gambar 4.6 Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar drying chamber fungsi <i>drying time</i> ..	89
Gambar 4.7 Pengaruh beban pengeringan terhadap <i>humidity ratio</i> ( $\Delta\omega$ ) fungsi <i>drying time</i> .....	90
Gambar 4.8 Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi <i>drying time</i> pada variasi beban pengeringan 300 gram .....	92
Gambar 4.9 Grafik perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi <i>drying time</i> pada variasi beban pengeringan 500 gram .....	93
Gambar 4.10 Grafik perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi <i>drying time</i> pada variasi beban pengeringan 700 gram.....	95
Gambar 4.11 Grafik pengaruh beban pengeringan terhadap <i>drying rate</i> fungsi <i>moisture content</i> .....	97
Gambar 4.12 Grafik pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan massa .....	99

## DAFTAR TABEL

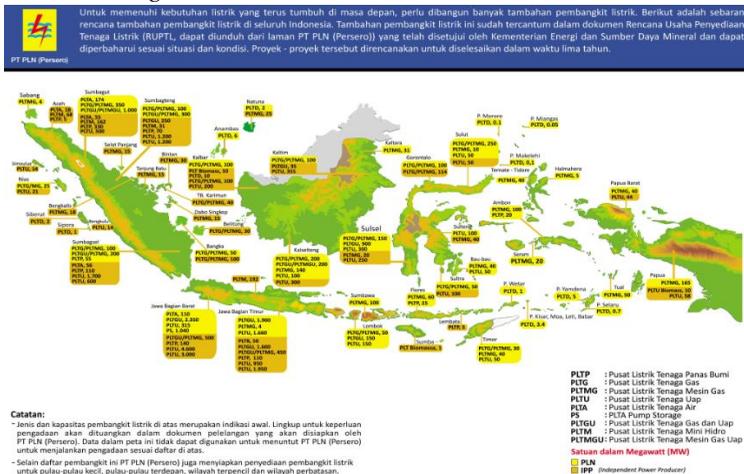
Tabel 1.1 Pengelompokan batubara .....	5
Tabel 3.1 Lembar Data Percobaan .....	60
Tabel 4.1 Data perhitungan <i>moisture content</i> untuk batubara.	71
Tabel 4.2 Data laju perpindahan massa.....	74
Tabel 4.3 Data perhitungan koefisien perpindahan massa dan panas .....	76
Tabel 4.4 RH out dan Temperatur pada beban pengeringan 300 gram, 500 gram dan 700 gram.....	83

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pada waktu dewasa saat ini, kemajuan teknologi melaju sangat pesat dan diiringi tumbuhnya perekonomian baik di kota-kota besar maupun didaerah pelosok sekalian. Kemajuan ini khususnya dibidang perindustrian pembangkit listrik, dimana kebutuhan atas hal tersebut sangat dibutuhkan untuk terus ada dan bertumbuh. Spesifiknya lagi pada negara Indonesia yang sangat terkenal dengan sebutan negara seribu pulau, yang memang dimana tersebar banyak pulau mulai dari yang pulau besar sampai dengan pulau-pulau terkecil yang sangat banyak didaerah geografis negara Indonesia. Di Indonesia sendiri sudah banyak pembangunan pembangkit baik yang direncanakan akan dibangun, sedang proses kontruksi, maupun yang telah proses *commissioning*.



**Gambar 1.1** Persebaran potensi pembangkit listrik di Indonesia.

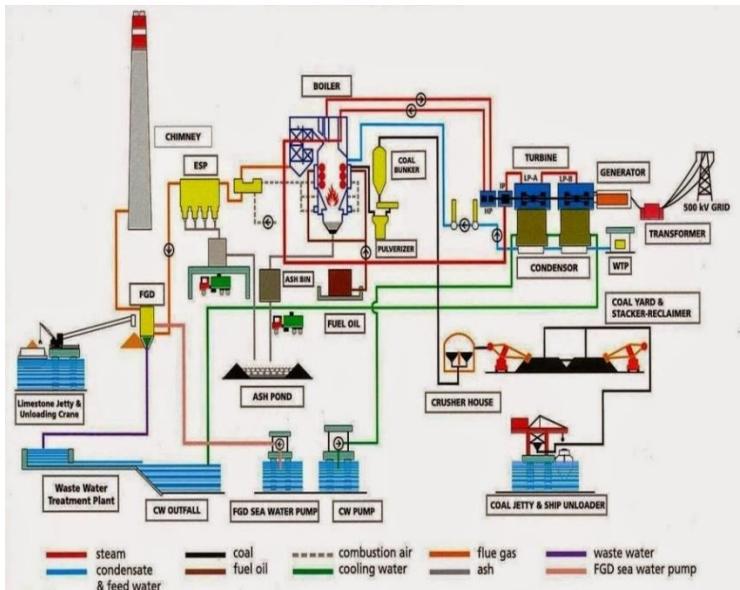
## Distribusi Batubara Indonesia



**Gambar 1.2** Distribusi persebaran batubara di Indonesia.

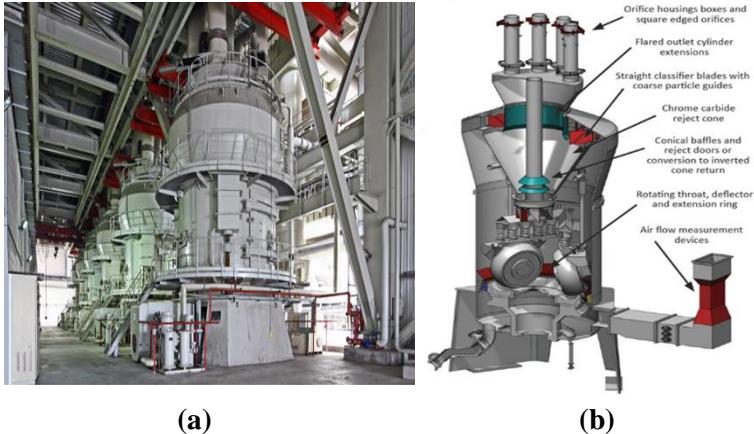
Dapat dilihat pada gambar 1.2 diatas adalah ditribusi persebaran batubara di Indonesia beserta presentase produksi berdasarkan kualitasnya, yaitu pada level *low-rank* (lignit) dan (sub-bituminous) adalah jenis batubara yang terdapat di Indonesia dengan presentase masing-masing  $\pm 60\%$  dan  $\pm 25\%$ . Sedangkan level *medium-rank* (bituminous) menempati urutan ketiga dengan presentase  $\pm 14\%$  dan diikuti dengan level *high-rank* (Antrasit) dengan jumlah presentase  $\pm 1\%$ . Hal ini menunjukkan bahwa ketersediaan batubara untuk kebutuhan industri pembangkit yang tinggi, ialah batubara dengan level *low-rank* (lignit) yang dapat memenuhi kebutuhan tersebut dan dengan ini mengartikan bahwa batubara yang digunakan memiliki nilai kalor rendah.

Pada PLTU berbahan bakar batubara, salah satu komponen penting yaitu Boiler. Dimana boiler ini didesain dengan spesifikasi bahan bakar tertentu, batubara sebagai bahan bakar pada boiler harus menyesuaikan spesifikasi boiler tersebut.



**Gambar 1. 3** Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

Salah satu komponen utama *boiler* dalam PLTU adalah *Coal firing system* (CFS) ialah suatu sistem pengkondisian bahan bakar batubara yang berfungsi untuk mengkondisikan batubara sebagai bahan bakar utama yang ada didalam silo penampung batubara menuju ruang bakar dalam proses pembakaran di dalam ruang *furnace* (boiler). Subsistem CFS sendiri terdiri dari 5 komponen utama yaitu *pulverizer*, *primary air heater*, *coal feeder*, *primary air fan*, dan *steam coil*.



**Gambar 1.4** (a) *Pulverizer* (b) *Skema Pulverizer*

*Pulverizer* berguna untuk menghaluskan batubara sebelum memasuki *boiler* sampai dengan ukuran batubara telah sesuai dengan spesifikasi *boiler*, karena hal ini menjadikan *pulverizer* sebagai salah satu komponen penting subsistem CFS. Dengan hubungan antara batubara dan *pulverizer*, dimana ketersediaan batubara yang memiliki nilai kalor rendah sehingga menyebabkan *pulverizer* melakukan kerja ekstra dan kontinyu dalam mensuplai batubara ke dalam ruang bakar *furnace*. Dalam proses yang kontinyu ini, biasanya dipasang standby *pulverizer* yang digunakan untuk menggantikan fungsi *pulverizer* yang mengalami kerusakan. Dengan kualitas batubara yang digunakan dibawah spesifikasi *boiler*, maka *pulverizer* akan mensuplai batubara dalam proses pembakaran akan semakin tinggi.

Karena suplai yang dibutuhkan cukup tinggi, menyebabkan *pulverizer* bekerja maksimum untuk memenuhi kapasitas yang diinginkan oleh *boiler* tersebut, masalah yang akan timbul adalah apabila terjadi kerusakan pada salah satu *pulverizer* maka hal ini akan berimbas pada kapasitas *mill* akan menurun, dimana efek tersebut akan berdampak pada performansi *boiler* dari PLTU.

Terkait dengan karakteristik batubara yang tersedia, sangat berhubungan dengan parameter-parameter lain pada suatu PLTU dimana hubungan ini saling terkait satu sama lainnya. Sebagai salah satu sumber panas dalam proses pembakaran di *boiler*, batubara harus memiliki nilai kalor yang tinggi agar dapat menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi pula dari suatu pembangkit. Nilai kalor itu sendiri sangatlah dipengaruhi oleh adanya *moisture content* yang terkandung dalam batubara tersebut. Semakin rendah nilai kalor dari batubara maka nilai *moisture content* dari batubara semakin tinggi, dikarenakan banyaknya kadar air dari batubara tersebut yang menyebabkan nilai kalornya rendah. Parameter-parameter yang disebutkan diantaranya *heat rate*, *heating value*, *stack flue gas* dan *stack loss*, efisiensi pembangkit, kapasitas *mill*, serta biaya pemakaian listrik dan pemeliharaan.

**Tabel 1.1** Pengelompokan batubara

Coal rank		Vitrinite reflectance (random)	Volatile matter (wt.% dmmf <sup>1</sup> )	Bed moisture (wt.%)	Calorific Value Moisture (moist, m/mf)	Hydro-carbon generation	Principal uses					
Class	Group											
Anthracitic <sup>2</sup>	Meta-anthracite	2.50	8	2	32.6	Dry Gas	Space heating					
	Anthracite						Chemical production					
	Semianthracite						1.92	14				
Bituminous	Low volatile bituminous	1.51	22	31	30.2	Wet Gas	Metallurgical coke production					
	Medium volatile bituminous						1.12	31	Cement production			
	High volatile A bituminous						0.50-0.75	31	30.2	Oil and Gas	Thermal electric power generation	
	High volatile B bituminous										0.75	32.6
	High volatile C bituminous										0.75	30.2
	High volatile C bituminous										0.50 ?	30.2
	Subbituminous						Subbituminous A <sup>3</sup>	0.42	25	25	26.8	Early Gas
Subbituminous B		24.4	Conversion to liquid and gaseous petroleum substitutes									
Subbituminous C		22.1										
Lignitic	Lignite A	0.42	35	35	19.3	Early Gas	Thermal electric power generation					
	Lignite B						14.7	Clair production				
	Peat			75			Space heating					

1) dmmf - Dry, mineral matter free

2) Non-agglomerating; if agglomerating, classified as low volatile bituminous

3) If agglomerating, classified as high volatile C bituminous

Ciri dari batubara untuk kadar kandungan air dengan level rendah seperti lignit dan *sub-bituminous* memiliki nilai presentase 25 sampai dengan 40 % pada batubara lignit, dan pada *sub-bituminous* dengan nilai 15 sampai dengan 30 %. Dengan nilai rata-rata dibawah 40% maka ini menjadi permasalahan yang perlu diperhatikan dengan mencari alternatif yang tepat sasaran, dengan demikian solusi yang cukup menarik adalah dengan teknologi pengering batubara (*Coal Drying*). Dengan adanya alternatif ini maka nilai kalor batubara yang akan dinaikkan sampai dengan nilai kalor telah sesuai desain *boiler* PLTU.

Teknologi dari alat pengeringan batubara sendiri dewasa ini semakin berkembang, berbagai jenis-jenis alat pengering batubara diantaranya *microwave dryer*, *flash dryer*, *rotary dryer*, *fluidized bed dryer (cyclone)*, dan masih banyak jenis lainnya. Pada penelitian dalam penyusunan tugas akhir ini, digunakan jenis alat pengering *cyclone coal dryer*. Alat pengeringan ini menggunakan prinsip fluidisasi, yaitu mengalirkan udara panas sebagai udara pengering melalui *blade* yang memiliki sudut khusus sehingga akan menimbulkan arah aliran udara pengering memutar pada bagian *drying chamber* sehingga menyebabkan batubara terangkat atau terfluidisasi. Dengan memvariasikan beban pengeringan dari batubara tersebut, penelitian kali ini bermaksud untuk mengetahui dampaknya terhadap proses pengeringan dalam batubara.

### **1.1. Rumusan Masalah**

Dalam penelitian proses pengeringan batubara, diharapkan mampu meningkatkan kualitas batubara, sehingga dirumuskan beberapa permasalahan, diantaranya:

- Bagaimana karakteristik laju pengeringan batubara pada *cyclone coal dryer* dengan variasi beban pengeringan batubara 300 gr, 500 gr dan 700 gr.
- Bagaimana hubungan perpindahan panas dan massa terhadap proses pengeringan batubara pada *cyclone coal dryer*.
- Bagaimana karakteristik udara pengering dalam grafik psikrometrik.

## **1.2. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian mengenai studi numerik proses pengeringan batubara yaitu:

- Mengetahui pengaruh variasi beban pengeringan terhadap laju pengeringan pada *cyclone coal dryer*
- Mengetahui hubungan perpindahan panas dan massa terhadap pengeringan batubara pada *cyclone coal dryer*
- Mengetahui karakteristik udara pengering dalam grafik psikometrik

## **1.3. Manfaat Penelitian**

Studi tentang proses pengeringan batu bara ini diharapkan mampu memberikan manfaat, antara lain:

- Memperluas pengetahuan tentang studi eksperimental mengenai proses pengeringan batubara dalam pengembangan teknologi *coal dryer* sebagai upaya untuk menaikkan kualitas batubara khususnya pada *cyclone coal dryer*.
- Sebagai perhitungan hasil eksperimental yang nantinya bisa digunakan untuk perbandingan metode pengeringan yang lain.
- Memaksimalkan penggunaan batubara dengan level rendah dengan proses pengeringan.

## **1.4. Batasan Masalah**

Pada penelitian ini, ditentukan beberapa batasan masalah, antara lain:

- Permasalahan dibatasi pada *drying chamber*.
- Massa batubara yang digunakan 300 gr, 500 gr dan 700 gr.
- Batubara yang digunakan berdiameter  $\pm$  6mm.
- Sudut blade yang digunakan adalah 20°.
- Diameter *drying chamber* adalah 190mm.

### 1.5. Sistematika Laporan

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

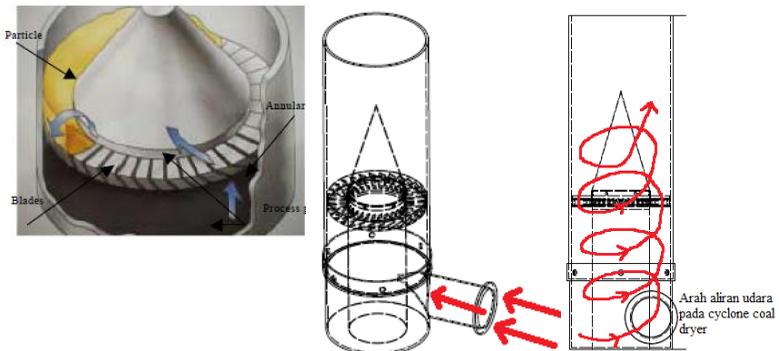
- **BAB I PENDAHULUAN**, Bab ini berisi tentang latar belakang dari penelitian ini, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat dari penelitian yang dilakukan, batasan masalah penelitian, dan sistematika laporan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**, Bab ini dibagi menjadi 2 bagian, yaitu dasar teori dan penelitian terdahulu yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang mendukung serta menunjang dalam penganalisaan hasil penelitian. Sedangkan penelitian terdahulu yang sudah ada berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang ada korelasinya dengan penelitian kali ini, yang juga menjadi pendukung serta 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 hasil perhitungan dan kemudian dianalisa dan didiskusikan lebih lanjut.
- **BAB V PENUTUP**, Bab penutup ini, terdiri dari kesimpulan dari hasil penelitian ini dan saran yang perlu diberikan.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

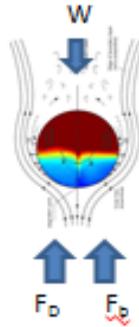
### 2.1 Dasar Teori

#### 2.1.1. Konsep Dasar *Cyclone Coal Dryer*

*Cyclone coal dryer* merupakan alat pengering batubara dengan prinsip fluidisasi. Fluidisasi merupakan proses pengontakan butiran-butiran padat secara bebas dengan fluida baik itu fluida cair maupun fluida gas. Gaya *drag* akan terjadi ketika butiran padat dikenakan udara (fluida) yang bergerak dengan kecepatan tertentu. Dengan nilai dari gaya *drag* yang ditimbulkan oleh berat butiran padat (partikel batubara) lebih kecil dari fluida (udara) maka yang akan terjadi adalah partikel batubara dapat melayang atau terfluidisasi. Secara umum bentuk visual dari *cyclone coal dryer* dapat diilustrasikan pada gambar 2.1 seperti dibawah ini.



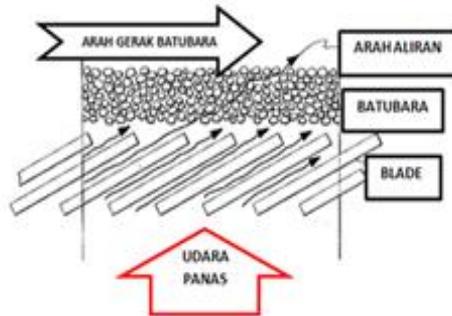
**Gambar 2.1** Bentuk dari *Cyclone coal dryer*



**Gambar 2.2** *Drag force* dan gaya berat

Pada prinsip fludisasi untuk gaya *drag* dan gaya berat dari partikel batubara ini adanya istilah gaya hambat ( $F_D$ ) dan gaya apung ( $F_b$ ), gaya hambat adalah komponen gaya fluida pada partikel yang searah dengan arah aliran atau gerakan partikel. Sedangkan unuk gaya apung adalah gaya yang terjadi pada partikel seolah-olah partikel tersebut terapung dalam fluida yang bergerak mengenai partikel sehingga terjadi kesetimbangan antara berat partikel ( $W$ ) dengan gaya apung dan gaya hambat dari fluida yang berada disekelilingnya.

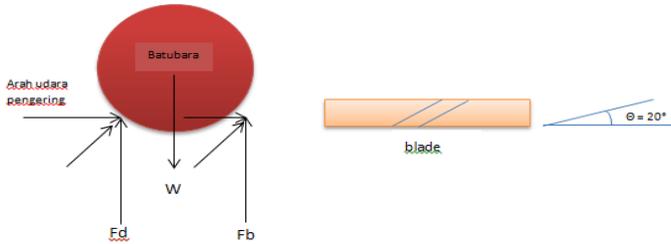
Pada konsep ini udara panas yang digunakan sebagai udara pengering diarahkan menuju sebuah *blade* yang tersusun dengan kemiringan tertentu. Jarak antar blade membentuk sebuah rongga-rongga yang nantinya akan dilewati oleh udara pengering, kecepatan dari udara pengering yang melewati *blade* akan menimbulkan gaya *drag* dan membentuk arah aliran udara pengering yang hampir sama dengan sudut kemiringan dari *blade*. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3



**Gambar 2.3** Arah aliran udara pengering dalam fluidisasi

Gaya *drag* yang dihasilkan akan mendorong partikel batubara sehingga bergerak menurut arah kecepatan udara pengering yang dialirkan melalui rongga-rongga *blade*. Proses ini terjadi pada ruangan *drying chamber* yang terbuat dari bahan akrilik dengan bentuk tabung dan dengan ketebalan tertentu, dengan ini artinya partikel batubara akan berputar dikarenakan gaya sentrifugal yang timbul seperti *cyclone*.

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



**Gambar 2.4** Free Body Diagram

$$\sum F = 0$$

$$F_D \sin \theta + F_B \sin \theta - W = 0$$

$$F_D + F_b = W$$

$$\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{udara} \cdot v^2 \cdot A \sin \theta = \rho_{batubara} \cdot \forall \cdot g$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \rho_{batubara} \cdot \forall \cdot g}{C_D \cdot \rho_{udara} \cdot A \sin \theta}} \quad (2.1)$$

dimana:

$$F_D = \text{Gaya drag dari batubara, } (kg \cdot m/s^2)$$

$$F_b = \text{Bouyancy Force (diabaikan karena kecil)}$$

$$W = \text{Berat dari batubara, } (kg \cdot m/s^2)$$

$$C_D = \text{Koefisien drag dari batubara}$$

$$v = \text{Kecepatan fluidisasi minimum, } (m/s)$$

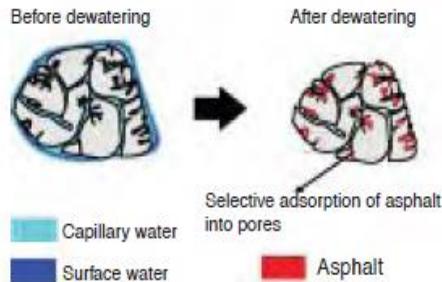
$$A = \text{Luas permukaan batubara, } (m^2)$$

$$\forall = \text{Volume batubara, } (m^3)$$

$$g = \text{Percepatan gravitasi, } (m/s^2)$$

### 2.1.2 Konsep Pengeringan

Pada konsep pengeringan ini mengalami proses pengurangan *moisture content* pada produk dimana dilalui dengan proses pengeringan batubara. Proses ini memiliki tujuan untuk mendapatkan nilai kalor setinggi mungkin dengan cara pengurangan *moisture content* dalam produk batubara. Kadar air yang terkandung dalam batubara harus sedikit mungkin, karena akan mempengaruhi kualitas dari produk tersebut.

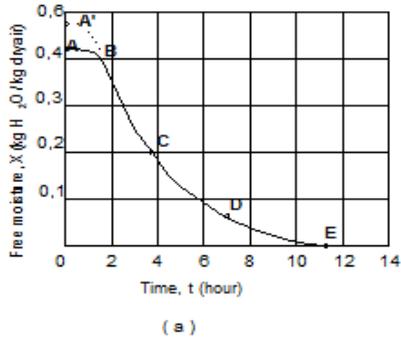


**Gambar 2.5** Proses pengeringan

Proses pengeringan pada suatu produk batubara yang terjadi, secara umum dibagi menjadi 2 bagian jenis kandungan air yang berada pada batubara, yang pertama adalah *surface water* dan *capillary water*. *Surface water* adalah kandungan air yang berada pada permukaan dari batubara, sedangkan *capillary water* adalah kandungan air yang berada dibagian dalam atau terikat secara kimia pada batubara.

Proses pengeringan batubara memiliki beberapa tahapan hingga produk yang dihasilkan telah sesuai. Secara umum ada 3 tahapan dalam proses ini, untuk yang pertama tahapan laju pengeringan naik dimana kondisi awal sesaat produk batubara

menerima panas dari udara pengering, selanjutnya yaitu tahapan laju pengeringan konstan dimana pada tahapan ini terjadi titik kritis (*critical moisture content*) pada batubara. Dan berikutnya adalah tahapan laju pengeringan menurun dimana terjadi kondisi air tidak dapat mempertahankan lapisan air sehingga seluruh bagian mengering.



**Gambar 2.6** Grafik fungsi *moisture content* terhadap waktu

Dalam grafik diatas diterangkan beberapa tahapan dalam proses pengeringan untuk batubara, dan berikut penjelasan beberapa tahapannya:

1) Tahapan Laju Pengeringan Naik

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

2) Tahapan Laju Pengeringan Konstan

Pada tahapan ini (B-C) permukaan dari batubara akan jenuh dikarenakan oleh uap air, temperatur  $T_{wb}$  dari udara akan sama dengan temperatur dari uap air yang terjadi pada permukaan batubara. Tahapan ini akan berakhir apabila nilai kandungan air

bebas batubara telah mencapai titik kritis (*critical moisture content*). Titik kritis yang dimaksudkan pada tahapan ini adalah nilai dari kadar air bebas berada pada kondisi terendah ketika laju kecepatan air bebas menuju permukaan sama dengan laju penguapan.

### 3) Tahapan Laju Pengeringan Menurun Awal

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

### 4) Tahapan Laju Pengeringan Menurun Kedua

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

Pada proses pengeringan ada beberapa faktor yang mempengaruhi laju pengeringan diantaranya adalah luas permukaan kontak, perbedaan suhu antara batubara dengan udara pengering, kecepatan aliran udara pengering, dan kelembaban relative udara pengering. Berikut penjelasan lebih lanjut mengenai faktor-faktor tersebut.



**Gambar 2.7** Faktor yang mempengaruhi proses pengeringan

**a) Luas permukaan**

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

**b) Perbedaan Suhu dan udara sekitar**

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

temperatur pengeringan maka perpindahan massa akan semakin cepat.

**c) Kecepatan Aliran Udara**

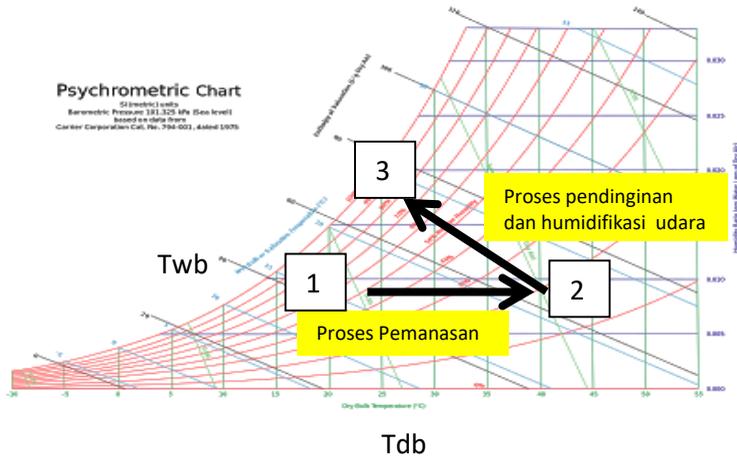
Kecepatan yang semakin tinggi dari udara pengering akan mengambil uap air dan menghilangkan uap air dari bagian permukaan batubara. Hal ini akan mencegah terjadinya udara jenuh, sehingga proses perpindahan massa air tidak terhambat. Proses pengeringan akan semakin cepat sehingga semakin cepat dan mudah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

**d) Kelembaban Udara (RH)**

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

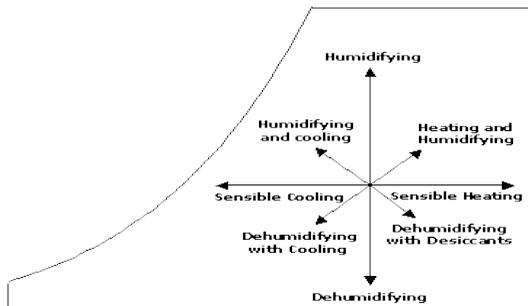
**2.1.3. Prinsip *Psychrometric Chart*.**

Psikrometri adalah salah satu bagian dari disiplin ilmu termodinamika yang mengkaji tentang sifat-sifat campuran udara dengan uap air yang memiliki arti penting dalam proses pengeringan. Sifat-sifat tersebut antara lain : *dew point*, *temperature wet bulb*, *temperature dry bulb*, kelembaban relatif, *enthalpy*, rasio kelembaban, dan volume spesifik. Pada gambar dibawah ini menunjukkan diagram *psychrometric* yang menunjukkan proses pengeringan pada  $T_{wb}$  konstan. Secara lebih rinci grafik *psychrometric* dapat dilihat pada gambar 2.7 seperti berikut.



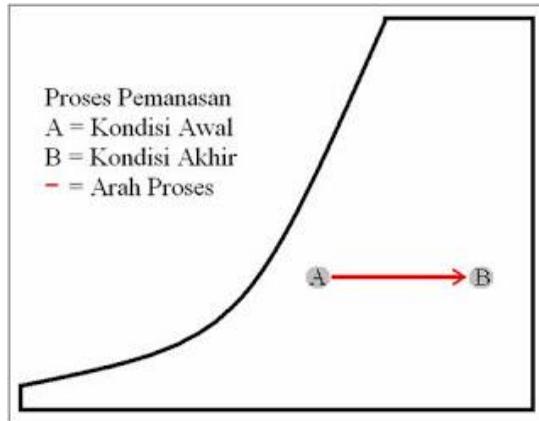
**Gambar 2.8** Proses pemanasan dan pengeringan pada *Psychrometric Chart*

Pada diagram *Psychrometric*, dikenal 8 proses yang dialami oleh udara, sebagai detail proses gambar dibawah ini dapat menjelaskan :



**Gambar 2.9** Proses pada psikrometrik chart

➤ **Proses Pemanasan (*Heating*)**

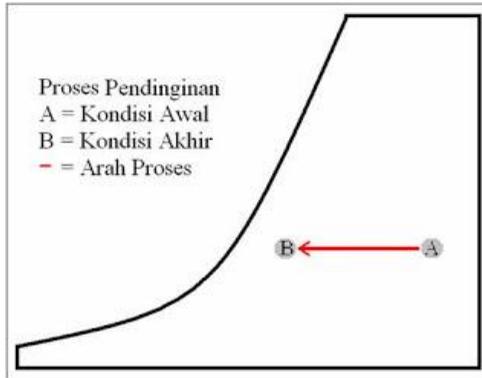


**Gambar 2.10** Proses pemanasan

Pada gambar 2.10 diatas menunjukkan proses pemanasan pada udara yang terjadi pada grafik *psychrometric*. Proses pemanasan adalah proses penambahan kalor *sensibel* ke udara sehingga temperatur udara naik, pada proses ini rasio kelembaban dari udara akan tetap konstan. Sedangkan temperature *dry bulb* akan berubah. Proses pemanasan pada psikrometrik ditunjukkan oleh garis mendatar ke kanan.

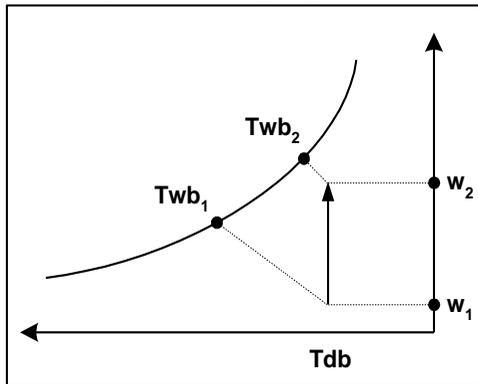
➤ **Proses Pendinginan (*Cooling*)**

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



**Gambar 2.11** Proses pendinginan

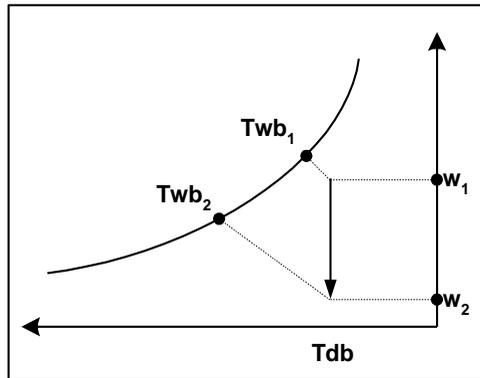
➤ **Proses Pelembapan (*Humidifying*)**



**Gambar 2.12** Proses pelembaban

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

➤ **Proses Penurunan Kelembapan (*Dehumidifying*)**

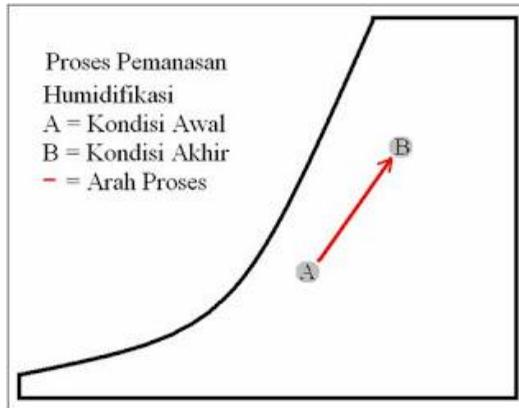


**Gambar 2.13** Proses penurunan kelembapan

Proses penurunan kelembapan terjadi dengan adanya pengurangan kandungan uap air ke udara sehingga terjadi penurunan entalpi dan rasio kelembapan. Proses ini terjadi adanya perubahan kalor laten tetapi tidak disertai dengan perubahan kalor *sensibel*. Proses Penurunan kelembapan sendiri tidak lain adalah kebalikan dari proses penambahan kelembapan. Proses penurunan kelembapan pada psikrometrik ditunjukkan dengan garis vertikal ke bawah.

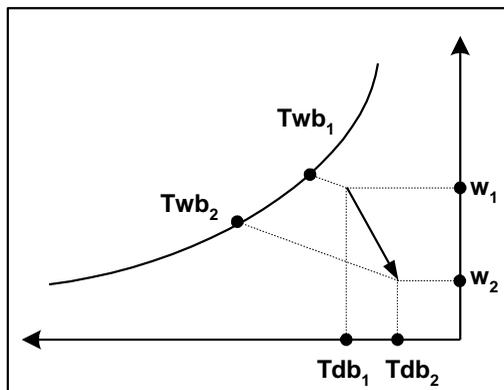
➤ **Proses Pemanasan dan Pelembapan (*Heating and Humidifying*)**

Pada proses ini udara dipanaskan disertai dengan penambahan uap air, yaitu dengan mengalirkan udara melewati ruangan semburan air atau uap yang temperaturnya lebih tinggi dari temperature udara. Didalam grafik *psychrometric* proses pemanasan dan pelembapan dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Proses pemanasan dan pelembapan

➤ **Proses Pemanasan dan Penurunan Kelembapan (*Heating and Dehumidifying*)**



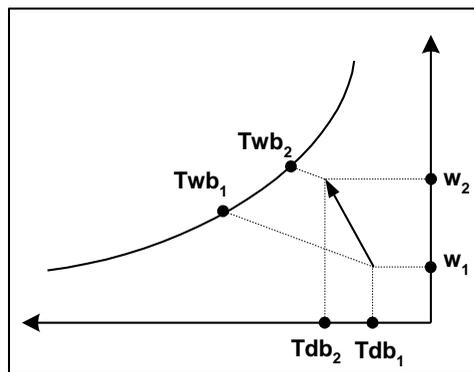
**Gambar 2.15** Proses pemanasan dan penurunan kelembapan

Pada gambar diatas ini ditunjukkan proses pemanasan dan penurunan kelembapan yang terjadi pada grafik *psychrometric*. Pada proses ini udara didinginkan terlebih dulu hingga

temperaturnya berada dibawah titik embun udara, pada kondisi ini udara akan mengalami pengembunan dan menyebabkan kandungan uap air akan berkurang, kemudian udara dilewatkan melalui koil pemanas sehingga menyebabkan temperatur udara akan meningkat.

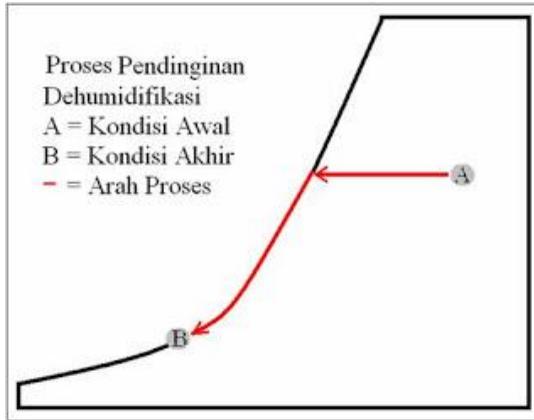
➤ **Proses Pendinginan dan Pelembapan (*Cooling and Humidifying*)**

Dalam proses ini dilakukan dengan melewati udara pada ruangan semburan air yang temperaturnya lebih rendah dari temperatur udara, tetapi lebih tinggi dari titik embun udara sehingga temperatur akan mengalami penurunan dan rasio kelembaban akan mengalami peningkatan. Pada grafik *psychrometric* ditunjukkan pada gambar 2.16.



**Gambar 2.16** Proses pendinginan dan pelembapan

➤ **Proses Pendinginan dan Penurunan Kelembapan (*Cooling and Dehumidifying*)**



**Gambar 2.17** Proses pendinginan dan penurunan kelembapan

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

Dalam proses pengeringan dan pada *psychrometric chart* adanya beberapa istilah yang sering digunakan antara lain

- **Moisture Content basis basah**

Kadar air (*moisture content*) basis basah terdefinisi sebagai massa air dalam produk dibagi massa produk basah, dijelaskan secara detail dibawah ini.

$$\text{M.C}(\%) \text{ } bb = \frac{\text{mp,basah} - \text{mp,kering}}{\text{mp,basah}} \times 100 \% \quad (2.2)$$

dimana:

MC(%) ) bb : Kadar air dari produk basis basah (%)

$m_{p, \text{kering}}$  : Massa bahan (batubara)akhir dalam kondisi kering (kg)

$m_{p, \text{basah}}$  : Massa bahan (batubara) awal dalam kondisi basah (kg)

- **Rasio Kelembapan**

Rasio kelembapan adalah massa dari uap air dibagi massa dari udara kering yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\omega = \frac{m_{\text{uap air}}}{m_{\text{udara kering}}} \quad (2.3)$$

dimana:.

$\omega$  : rasio kelembapan udara (kg/kg)

$m_{\text{udara kering}}$

: massa dari udara kering, (kg udara kering)

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

- **Drying Rate**

*Drying rate* ini adalah banyaknya air yang menguap pada suatu bahan yaitu batubara dalam waktu tertentu, dirumuskan untuk *drying rate* sebagai berikut.

$$\text{Drying rate} = \frac{\Delta MC_{wb}}{\Delta t} \quad (2.4)$$

dimana:

$\Delta MC_{wb}$  : kadar air suatu bahan basis basah

$\Delta t$  : waktu

- **Fraksi Massa**

Fraksi massa adalah perbandingan antara massa dari uap air dengan massa massa dari uap air ditambah dengan massa dari udara, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Y = \frac{m_{\text{uap air}}}{m_{\text{uap air}} + m_{\text{udara kering}}} \quad (2.5)$$

dimana:

Y : adalah fraksi massa  
 $m_{\text{uap air}}$  : massa dari uap air (kg)  
 $m_{\text{udara kering}}$  : massa dari udara kering (kg)

- **Kelembapan Relatif (*Relative Humidity*)**

Kelembapan relatif merupakan perbandingan dari fraksi molekul uap air didalam udara basah dengan fraksi molekul uap air jenuh pada tekanan dan temperatur yang sama.

$$\Phi = \frac{p_{\text{uap}}}{p_{\text{jenuh}}} \times 100\% \quad (2.6)$$

dimana:

$\Phi$  : kelembapan relatif  
 $p_{\text{jenuh}}$  : tekanan jenuh uap air (kPa)  
 $p_{\text{uap}}$  : tekanan uap air (kPa)

#### 2.1.4 Konsep Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa

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

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

Dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi antara bagian dalam batubara dengan bagian permukaan batubara, konsentrasi air pada bagian dalam batubara lebih besar dibandingkan bagian permukaan.



**Gambar 2.18** Proses Untuk Pengeringan Batubara

Penguapan adalah proses di mana cairan diubah menjadi gas, penguapan juga adalah konversi dari cair ke uap nya di bawah suhu didih cairan. Proses perubahan molekul di dalam keadaan cair contohnya air, dengan spontan menjadi gas contohnya uap air. Proses ini adalah kebalikan dari kondensasi, umumnya penguapan dapat dilihat dari lenyapnya cairan secara berangsur-angsur ketika terpapar pada gas dengan volume signifikan.

Beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan penguapan zat cair adalah:

- Luas permukaan dari zat cair, lepasnya molekul zat cair tidak dapat berlangsung secara serentak akan tetapi bergiliran dimulai dari permukaan zat cair yang punya kesempatan terbesar untuk melakukan penguapan. Dengan demikian untuk mempercepat penguapan kita juga bisa melakukannya dengan memperluas permukaan zat cair tersebut.
- Pengurangan tekanan udara pada permukaan zat cair berarti jarak antar partikel udara di atas zat cair tersebut menjadi lebih renggang. Dengan memperkecil tekanan udara pada permukaan zat, berakibat jarak antar molekul udara menjadi besar. Hal ini mengakibatkan molekul-molekul pada permukaan zat cair akan berpindah ke udara di atasnya sehingga mempercepat proses penguapan. Akibatnya molekul air lebih mudah terlepas dari kelompoknya dan mengisi ruang kosong antara partikel-partikel udara tersebut.
- Gerakan udara yang lebih cepat akan memindahkan lebih banyak uap air dan lebih cepat kecepatan penguapannya. Tapi terdapat faktor yang bertentangan, sebagai contoh, kecepatan udara yang sangat cepat akan mendinginkan air, dimana mengurangi tekanan uap dan kecepatan penguapan.

Perpindahan yang terjadi dalam proses pengeringan adalah perpindahan massa dari bagian permukaan batubara menuju ke udara pengering secara konveksi. Dengan diketahui perpindahan massa yang terjadi secara konveksi, sehingga untuk laju perpindahan molar maka dirumuskan dengan :

$$N''_A = h_m \cdot (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (2.7)$$

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

$$n''_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.8)$$

dimana :

$N''_A$  : Laju perpindahan molar

$n''_A$  : Laju perpindahan massa

$C_{A,\infty}$  : konsentrasi uap air di medium pengering  
(kgmol/m<sup>3</sup>)

$C_{A,s}$  : konsentrasi uap air di bagian permukaan bahan  
(kgmol/m<sup>3</sup>)

$\rho_{A,\infty}$  : rapat massa uap air di medium pengering  
(kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{A,s}$  : rapat massa uap air di bagian permukaan bahan  
(kg/m<sup>3</sup>)

$A$  : Luas dari bahan (m<sup>2</sup>)

$h_m$  : koefisien konveksi perpindahan massa ( m/s)

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

$$Sh = \frac{hm \cdot L}{D_{AB}} \quad (2.9)$$

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

$$Sh = f(x^*, Re_L) Sc^n \quad (2.10)$$

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

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \quad (2.11)$$

dimana :

- hm : Koefisien perpindahan massa (m/s)
- Dab : difusivitas
- L : panjang permukaan

Sedangkan nilai bilangan Reynold dapat dinyatakan dalam persamaan Reynold berikut :

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

dimana :

- Re : bilangan Reynold
- V : kecepatan aliran fluida (m/s)
- P : massa jenis (kg/m<sup>3</sup>)
- μ : viskositas absolut (m<sup>2</sup>/s)
- D : diameter (m)

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

$$Nu = f(x^*, Re) Pr^n \quad (2.13)$$

Nilai dari koefisien perpindahan panas konveksi berbanding lurus dengan *Nusselt Number* dimana ditunjukkan dalam persamaan 2.14 sebagai berikut :

$$h = \frac{Nu_D k_f}{L} \quad (2.14)$$

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

dimana :

$K$  = konduktivitas termal (J/kgK)

$h$  = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m<sup>2</sup>K)

$L$  = panjang karakteristik

Didapatkan rumus untuk proses evaporasi dari kesetimbangan energi yaitu bahwa besar dari energi kalor yang dilepaskan oleh udara pengering sama dengan kalor yang diterima pada bagian permukaan batubara dalam proses penguapan :

$$Q_{\text{batubara}} = Q_{\text{udara pengering}} \quad (2.15)$$

$$m_{\text{batubara}} \cdot c_p_{\text{batubara}} \Delta T_{\text{batubara}} = m_{\text{udara}} \cdot c_p_{\text{udara}} \Delta T_{\text{udara}}$$

dimana :

$Q_{\text{batubara}}$  : kalor dalam batubara

$Q_{\text{udara pengering}}$  : kalor dalam udara panas (udara pengering)

$m_{\text{batubara}}$  : massa dari batubara (kg)

$m_{\text{udara}}$  : massa dari udara panas (kg)

$c_p \text{ batubara}$  : panas spesifik dari batubara (J.kg/K)

$c_p$  udara : panas spesifik dari udara ( J.kg/K).

$\Delta T_{\text{batubara}}$  : perubahan temperatur dari batubara (K)

$\Delta T_{\text{udara}}$  : perubahan temperatur dari udara (K)

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

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.16)$$

dimana:

$q$  = kalor, (W)

$A$  = Luas permukaan benda ( $m^2$ )

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

$T_\infty$  = temperatur permukaan material, (K)

$T_s$  = temperatur infinity, (K)

### 2.1.5 Teknologi Pengeringan

Alat pengeringan batubara dalam dewasa ini sudah sangat banyak jenisnya, teknologi untuk alat pengeringan secara detail akan dijelaskan sebagai berikut.

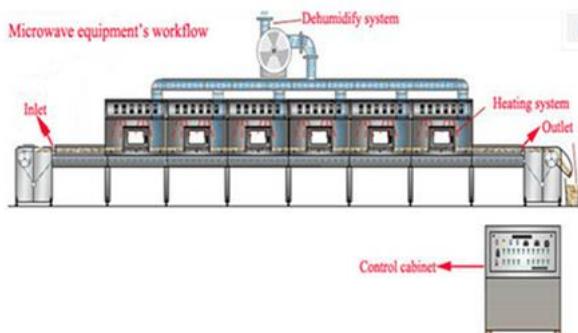
- **Rotary Dryer**



**Gambar 2.19** *Rotary dryer*

Pada model rotary dryer pada gambar 2.19 di atas adalah salah satu jenis dari teknologi pengeringan untuk batubara, alat ini memiliki bentuk silinder (*shell*) yang posisinya sedikit miring dan berputar sehingga sisi dari keluaran lebih rendah daripada sisi pemasukan produk (batubara). Batubara yang akan dikeringkan dimasukkan pada sisi masukan yang lebih tinggi sehingga produk dapat menuju sisi keluaran dikarenakan gaya gravitasi. Saat berada pada bagian dalam silinder, batubara akan bergerak naik turun dan berputar karena dipanaskan dengan aliran udara pengering.

- ***Microwave Dryer***

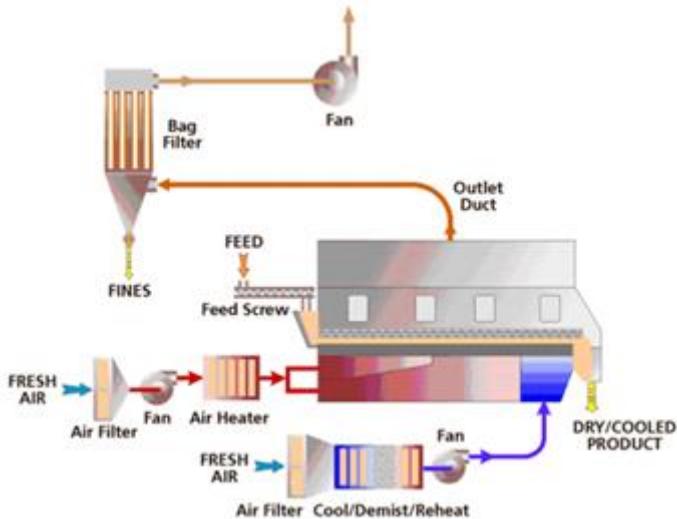


**Gambar 2.20** *Microwave dryer*

Alat microwave dryer ini adalah salah satu jenis teknologi pengeringan dengan menggunakan gelombang mikro, yaitu sebuah gelombang mikro yang ditransfer ke *moisture* pada material tanpa ikut memanaskan material terlebih dahulu. Mekanisme kerja alat ini adalah dengan sistem control, digunakan sensor *fotometrik* yang berguna untuk memantau kelembapan bagian permukaan didalam ruangan *microwave*. Pada alat pengering ini dihindari terjadinya *overheating* karena pengaturan temperatur di *set* dibawah  $\pm 105^{\circ}\text{C}$ .

- ***Fluidized Bed Dryer***

Untuk alat pengeringan jenis ini, sangat cocok digunakan untuk berbagai material yang berbentuk granular seperti batubara. Mekanisme kerja dari alat ini adalah Bahan yang akan dikeringkan dimasukkan secara konstan dan kontinyu kedalam ruang pengering, kemudian didorong oleh udara panas yang terkontrol dengan volume dan tekanan tertentu. Bahan yang telah kering (karena bobotnya sudah lebih ringan) akan keluar dari ruang pengeringan menuju siklon untuk ditangkap dan dipisahkan dari udara, namun bagi bahan yang halus akan ditangkap oleh pulsejet bag filter. Model *fluidized bed dryer* secara lebih rinci dapat dilihat pada gambar 2.21 Proses kontak antara aliran udara dengan material dalam pengering *fluidized bed* memberikan perpindahan panas dan massa yang tinggi, laju pengeringan tinggi karena mencegah *overheating* dari material, dan efisiensi termal yang tinggi. Kekurangan dari alat ini tidak dapat mengolah bahan yang lengket atau berkadar air tinggi dan abrasive.



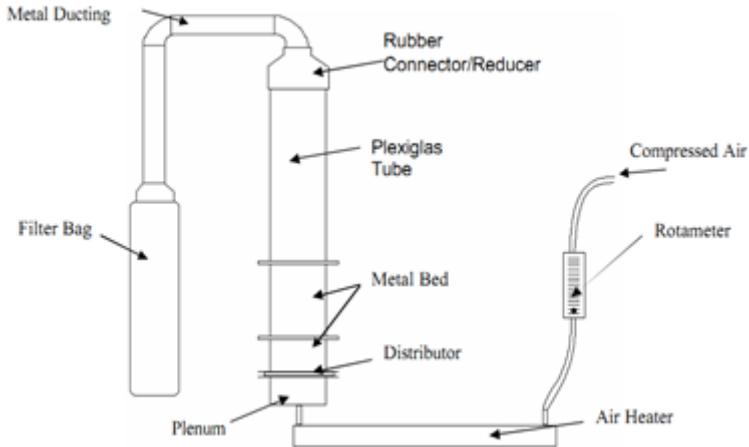
**Gambar 2.21** *Fluidized bed dryer*

## 2.2 Penelitian Terdahulu

### 2.2.1 Edward K Levy, dkk.

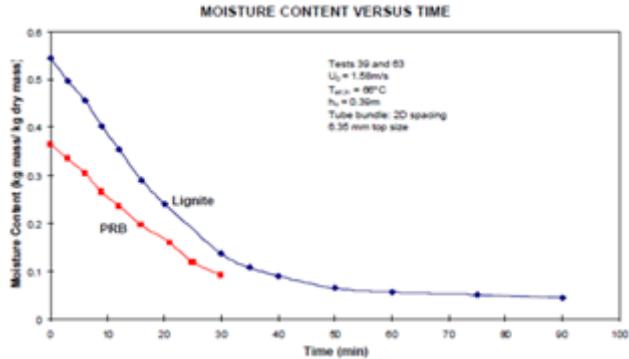
Dalam penelitiannya **Levy dkk (2006)** merancang sebuah peralatan eksperimental untuk melakukan analisa pengeringan batubara seperti pada Gambar 2.22. Pengujian alat eksperimen dilakukan dalam naungan Riset Energi *Center Fluidized Bed Laboratory*. Ruang pengeringan bertipe *fluidized bed* dengan diameter 6 inchi. Udara pemanas dirancang mencapai suhu 150<sup>0</sup> F dengan kecepatan mencapai 1.6 m/s.

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.



**Gambar 2.22** skema alat penelitian

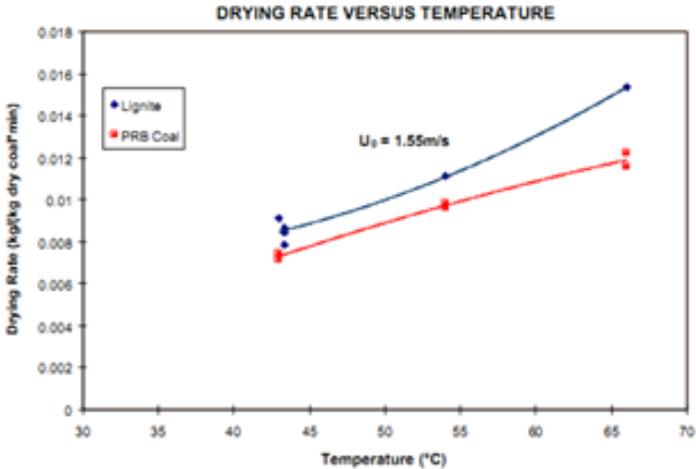
Dari penelitian ini didapatkan hasil penelitian berupa pengaruh pemakaian sistem pengering batubara terhadap keuntungan yang didapatkan dari penghematan yang diciptakan dari proses pengeringan batubara. Kandungan air yang berada di dalam batubara dapat dikurangi dari proses pengeringan. Batubara akan memiliki nilai kalor yang lebih baik dengan berkurangnya kandungan air 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 2.23** Grafik Moisture Content dalam fungsi waktu berdasarkan jenis batubara

Dalam penelitiannya **Levy dkk (2006)**, pada gambar 2.23 didapatkan grafik moisture content dalam fungsi waktu, dimana diperoleh yaitu semakin besar ukuran partikel dari batubara (lignit) yang digunakan maka akan semakin tinggi *moisture content* yang terkandung. Dan untuk partikel dengan ukuran lebih kecil (PRB) maka *moisture content* semakin rendah. Hal ini menyebabkan waktu pengeringan, semakin tinggi nilai *moisture content* maka akan semakin lama waktu pengeringan, dan begitu sebaliknya.

Berdasarkan data eksperimen pada penelitian yang dilakukan **Levy dkk (2006)** pada gambar 2.24, 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.



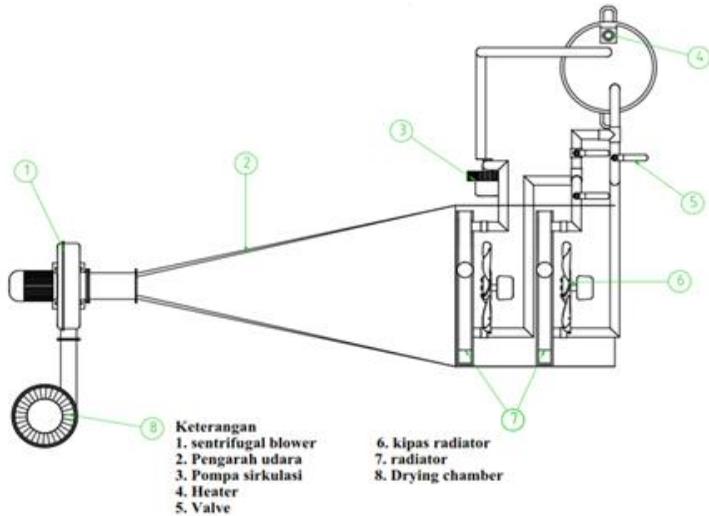
**Gambar 2.24** Grafik pengaruh kecepatan terhadap pengeringan batubara

Pada penelitian yang dilakukan oleh Levy dkk (2006) juga didapatkan pengaruh dari temperature udara pemanas yang akan dilewatkan pada ruangan pengering seperti pad gambar 2.24. Dalam penelitian ini divariasikan temperatur udara pemanas dari suhu 43<sup>0</sup>C hingga 66<sup>0</sup>C. 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 temperatur udara pemanas akan meningkatkan laju pengeringan batubara.

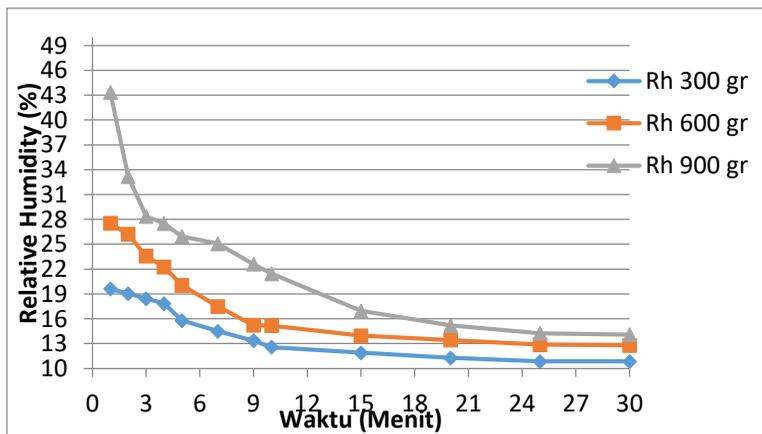
### 2.2.2 Adi Krisnawan

Dalam penelitiannya **Adi Krisnawan (2013)** dengan menggunakan prinsip *cyclone coal dryer*. Alat yang digunakan adalah sentrifugal *blower*, *heat exchanger*, *heater*, pompa, kipas radiator, dan *blade* bersudut 10°. Skema peralatan penelitian yang dilakukan ditunjukkan pada gambar 2.25. Air akan dipanaskan dalam tandon dengan *heater* yang kemudian dialirkan menuju

*heat exchanger* sehingga panas air tersebut akan berpindah ke udara dimana nanti udara ini akan menjadi udara pengering.

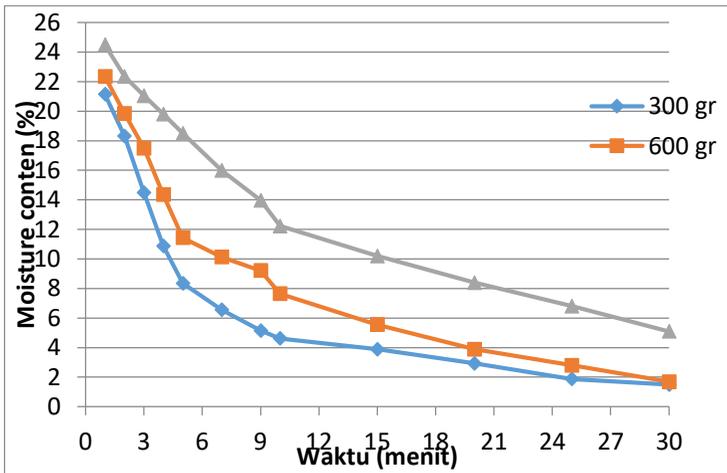


**Gambar 2.25** Skema alat penelitian



**Gambar 2.26** Grafik perubahan *Relative humidity* pada udara pengering

Relative humidity adalah perbandingan jumlah uap air didalam udara dengan jumlah uap air maksimum pada suhu tertentu. Gambar 2.25 menunjukkan besarnya *relative humidity* pada udara pengering dengan variasi beban pengeringan yang berbeda. Dari grafik didapatkan nilai *relative humidity* tertinggi pada jumlah beban pengeringan 900 gram, dikarenakan massa uap air pada beban tersebut paling banyak.



**Gambar 2.27** Grafik perbandingan *drying rate*

Grafik *drying rate* merupakan grafik perbandingan antara *moisture content* dan waktu, dimana dalam grafik ini menunjukkan perubahan *moisture content* pada batubara tiap waktu tertentu. Pada gambar 2.26 diatas ditunjukkan bahwa grafik *drying rate* untuk ketiga variasi beban pengeringan yaitu 300 gr, 600 gr, dan 900 gr. Beban 300 gr mengalami penurunan *moisture content* yang signifikan terhadap waktu pengeringan, kemudian diikuti dengan beban 600 gr dan 900 gr.

## **BAB III METODOLOGI**

### **3.1 Model Alat Pengeringan**

Penelitian ini dilakukan dengan basis pada penelitian *Edward K. Levy dan Adi Krisnawan* yang menggunakan jenis pengeringan dengan tipe *Swirling Fluidized Bed Dryer dan Cyclone Coal Dryer*. Tipe model alat pengeringan ini didesain untuk material yang berbentuk granular, seperti contohnya yaitu batubara. Proses pengeringan akan dilakukan pada *drying chamber* yang berbentuk silinder, dan nanti akan diisi batubara sebagai bahan yang dikeringkan.

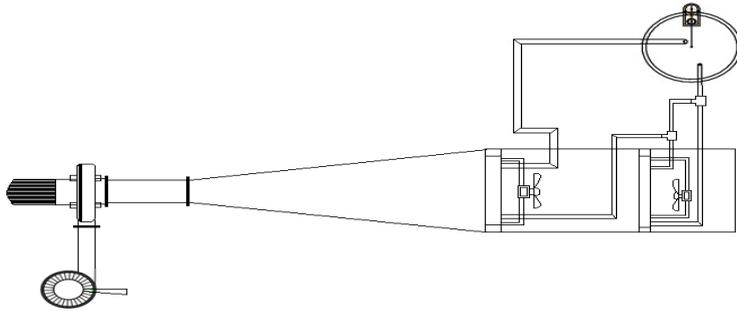
Batubara sebagai bahan yang dikeringkan pada *cyclone coal dryer* dalam rentang waktu yang ditentukan. Dan udara pengering diambil dari udara disekitar alat pengeringan atau udara lingkungan yang dipanaskan oleh sistem pemanas udara. Pemanas udara ini menggunakan *compact heat exchanger*, dimana udara yang telah dipanaskan ini akan dialirkan ke *drying chamber* dengan menggunakan *blower*. Untuk mendapatkan aliran udara yang bersirkulasi atau terjadi proses *cyclone*, maka dipasang *blade* pada bagian *drying chamber*. Pemasangan ini akan menyebabkan arah aliran udara akan mengikuti kontur dari *blade* tersebut, sehingga akan terjadi proses *cyclone* yang diharapkan membuat proses pengeringan ini akan menjadi optimal. Proses pengeringan menjadi optimal dikarenakan aliran udara akan menjadi turbulen, hal ini akan meningkatkan koefisien perpindahan panas dari udara pengering. Sedangkan dari sisi batubara akan mengalami proses olakan sehingga batubara akan terkena udara pengering secara menyeluruh pada permukaannya. Model dari alat pengeringan yang telah dirancang dapat dilihat pada gambar 3.1.



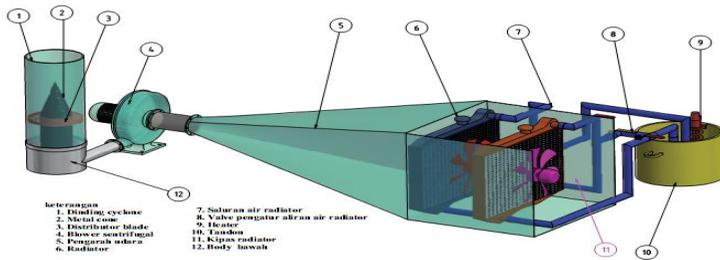
**Gambar 3.1** Model peralatan pengering *cyclone coal dryer*

Alat penelitian ini merupakan alat praktikum untuk skala laboratorium. Untuknya kedepan diharapkan alat ini dapat digunakan sebagai penunjang sistem yang sudah berjalan pada sistem pembangkit guna meningkatkan nilai kalor dari suatu batubara. Dalam alat penelitian ini jenis pemanas udara yang digunakan masih dengan jenis *compact heat exchanger* (radiator) yang bertujuan untuk menaikkan suhu udara *inlet* atau dengan kata lain sebagai *air heater*.

### 3.2. Skema Peralatan



(a)

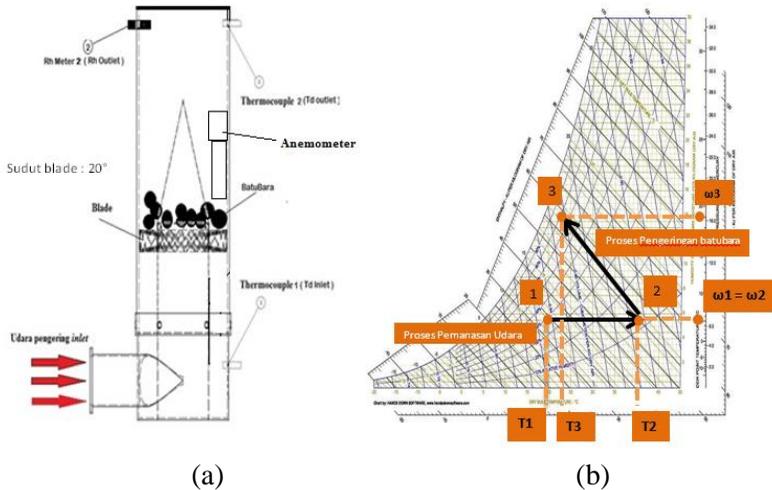


(b)

**Gambar 3.2** Skema peralatan *cyclone coal dryer* (a) 2D (b) 3D

### 3.3. Skema peletakan alat ukur

Untuk skema peletakan alat ukur pada alat pengerisan ini, sebagai berikut diilustrasikan pada gambar 3.3 untuk posisi peletakan alat ukur.



**Gambar 3.3** (a) Posisi peletakan alat ukur (b) diagram psikometrik

- Anemometer : untuk menghitung kecepatan udara pada posisi diatas *blade*
- Thermocouple 1: untuk mengukur temperatur *dry bulb* udara saat masuk *chamber*.
- Thermocouple 2: untuk mengukur temperatur *dry bulb* udara saat keluar *chamber*.
- Rh *inlet* : untuk mengukur nilai RH udara saat masuk *chamber*.
- Rh *outlet* : untuk mengukur nilai RH udara saat keluar dari *chamber*.

### 3.4. Variabel Penelitian

Dalam penelitian diperlukan variabel-variabel yang terkait. Hal ini dimaksudkan agar penelitian mempunyai arah dan tujuan yang jelas terkait data yang akan dicari dalam suatu penelitian. Pada penelitian ini, variabel-variabel yang akan ditentukan antara lain :

Variabel bebas	: Temperatur udara <i>inlet</i>
Variabel terkontrol	: Sudut blade 20°, diameter batubara, <i>drying chamber</i> , beban pengeringan yang divariasikan yaitu 300 gr, 500 gr, dan 700 gr.
Dimensi <i>chamber</i>	: Ukuran dari <i>chamber</i> yaitu diameter luar 200 mm, diameter dalam 190 mm, dengan tinggi 650 mm.
Suplai udara	: Menggunakan <i>blower</i> sentrifugal dengan daya 750 watt, untuk pengaturan kecepatan digunakan <i>voltage regulator</i> .
<i>Water heater</i>	: Menggunakan <i>heater</i> dengan daya total mencapai 4600 watt dengan jumlah <i>heater</i> 500 watt sebanyak 8 dan <i>heater</i> 600 watt sebanyak 1 buah.
<i>Water tank</i>	: Kapasitas $\pm$ 40 liter.
Alat penukar panas	: Jenis yang digunakan adalah <i>compact heat exchanger</i> (radiator). Pada eksperimen ini digunakan dua buah radiator yang dipasang seri, dan 1 kipas <i>indoor</i> , 1 kipas <i>outdoor</i> .
Batubara	: Batubara dengan ukuran rata-rata 6mm didapatkan dengan ayakan 10 mm dan 5mm, batubara diasumsikan berbentuk bola.

### 3.5. Peralatan Penunjang Eksperimen

Selain peralatan utama, diperlukan juga peralatan-peralatan penunjang dan alat ukur yang dibutuhkan untuk pengambilan data diantaranya adalah:

#### a. *Thermocouple*

*Thermocouple* merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur temperatur pada titik yang diamati. Eksperimen kali ini menggunakan *thermocouple* spesifikasi tipe K, berbahan pada sisi negatif nikel dan aluminium sedangkan pada sisi positif nikel dan kromium, dengan range

-40°C sampai 750°C serta range pengukuran 0-1100 °C. Pada eksperimen kali ini digunakan 4 buah *thermocouple* yang diletakan pada posisi sebagai berikut:

- *inlet radiator* (suhu air)
- *outlet radiator* (suhu udara daerah *heat exchanger*)
- *inlet drying chamber* (suhu udara pada *inlet drying chamber*)
- *outlet drying chamber* (suhu udara pada *outlet drying chamber*)

#### b. *Thermocouple Selector* (Data akuisisi)

*Thermocouple selector* atau data akuisisi ini memiliki fungsi untuk menampilkan besarnya temperature yang terbaca oleh *thermocouple*. Alat ini mengakuisisi data dari *thermocouple* yang direkap secara otomatis berdasarkan waktu, waktu yang didapat diatur pada *software* yang sudah harus terinstal di laptop atau PC. Pada eksperimen kali ini digunakan empat *thermocouple* yang masing-masing menunjukkan suhu air, udara di sekitar radiator, udara masuk *drying chamber* dan udara keluar *drying chamber*.



**Gambar 3.4** *Thermocouple selector*

Merk : Dagwork Yokogawa  
Tipe : MX 100

### c. Timbangan Digital

Timbangan digital ini memiliki fungsi untuk menimbang berat sampel yang akan diteliti. Data yang diperoleh adalah berat sampel untuk pengeringan dengan interval waktu yang telah ditentukan saat proses pengeringan dilakukan. Berat akhir dari sampel batubara juga akan ditimbang setelah proses pengovenan.



**Gambar 3.5** Timbangan Digital

Spesifikasi dari timbangan

Merk : Digital Scale PS38

Max : 200 gram

d (Ketelitian) : 0.01 gram

#### d. *Relative Humidity* - meter

*Relative humidity* – meter ini berfungsi untuk mengukur nilai kelembapan (*relative humidity*) dari udara. Dengan menggunakan Rh meter akan diketahui perbedaan nilai kelembapan dari udara pengering sebelum dan sesudah mengenai batubara, dari perbedaan yang didapatkan ini adalah sebagai perubahan nilai kelembapan tersebut.



**Gambar 3.6** Rh Meter

Spesifikasi

Merk : Omega

Tipe : RH-32

Akurasi RH : 0,001%

Akurasi suhu : 0,1 °C

### e. *Anemometer*

*Anemometer* merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur kecepatan udara. Pada eksperimen ini anemometer berfungsi untuk mengukur kecepatan angin pada saat masuk ke dalam chamber.



**Gambar 3.7** *Digital Anemometer*

Spesifikasi

Merk dan tipe : Mini digital anemometer

Speed range : 1 – 25 m/s

Akurasi :  $\pm 3\% \pm 0,2$  m/s

### f. *Thermocontrol*

*Thermocontrol* ini berfungsi untuk menjaga temperatur air pada tangka air agar tidak melebihi batas temperatur kerja. Alat ini dihubungkan ke bagian tangka air dan didalamnya ada *heater* dimana air akan disuplai melewati pompa menuju radiator yang nantinya akan menjadi udara pengering, alat ini sekaligus menjaga temperatur dari udara yang telah di set  $\leq 75^{\circ}\text{C}$ . Sehingga

udara yang akan memasuki inlet drying chamber akan terjaga yaitu  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 3.8** *Thermocontrol*

#### **g. Voltage Regulator**

Setelah mendapatkan nilai kecepatan fluidisasi minimum dari perhitungan, maka kecepatan udara pengering yang masuk ke dalam inlet harus memiliki nilai yang sama dengan perhitungan tersebut. Agar kecepatan udara pengering memiliki nilai sama dengan perhitungan dibutuhkan *voltage regulator* untuk mengatur kecepatan udara dari blower yang memasuki *drying chamber*.



**Gambar 3.9** *Voltage regulator*

### **h. Aquades**

Air aquades adalah fluida yang digunakan untuk dipanaskan di dalam tangki air. Penggunaan aquades cukup diperlukan untuk menjaga pipa-pipa yang menyalurkan fluida yang sudah dipanaskan tadi agar tidak berkarat ketika eksperimen telah dilakukan.



**Gambar 3.10** *Aquades*

### **i. Tool Kit**

Tool kit ini seperti halnya kunci inggris, obeng, tang, test pen, beserta baut sangat diperlukan untuk reparasi maupun *men-setting* peralatan yang digunakan. Selain itu hammer atau palu juga diperlukan untuk memecah batubara dari kondisi awal yang besar menjadi serpihan kecil berukuran 6mm.



**Gambar 3.11** *Tool kit*

**j. Ayakan Segiempat Ukuran 5 mm dan 10 mm**

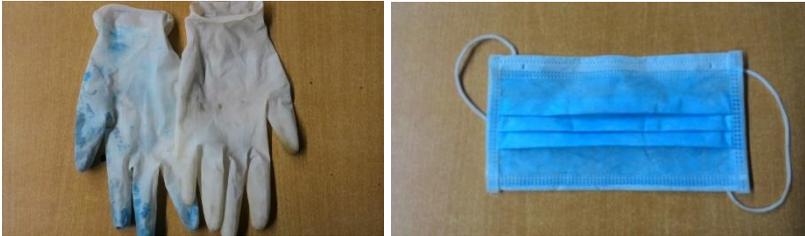
Penyaringan batubara dilakukan agar sesuai dengan kondisi eksperimen yang diinginkan yaitu berukuran sekitar  $\pm 6\text{mm}$  per partikelnya. Pertama-tama batubara akan diayak dengan menggunakan ayakan ukuran 10 mm kemudian setelah itu diayak kembali dengan ayakan ukuran 5 mm. Hasil akhirnya akan didapatkan ukuran partikel rata-rata batubara berkisar antara 5 mm – 10 mm.



**Gambar 3.12** Ayakan ukuran 5 mm dan 10 mm

### k. Sarung Tangan Karet dan Masker Pelindung

Sarung tangan digunakan ketika hendak melakukan pengambilan sampel di dalam *chamber* saat proses pengeringan dilakukan. Ini digunakan untuk mencegah adanya moisture yang berpindah dari tangan ke batubara saat diambil dari *chamber*.



**Gambar 3.13** Sarung tangan dan masker pelindung

### l. Cerobong Buang

Cerobong pembuangan dipasang dibagian atas *drying chamber*. Cerobong ini menghubungkan *drying chamber* dan jendela pembuangan. Cerobong sangat diperlukan agar debu maupun serpihan kecil dari batubara tidak berterbangan keluar dan mengotori kondisi ruangan.



**Gambar 3.14** Cerobong buang

**m. Oven**

Oven digunakan sebagai alat untuk menghabiskan sisa moisture content pada batubara setelah proses pengeringan berlangsung. Batubara yang telah dikeringkan pada *drying chamber* akan di oven lagi dan nantinya akan ditimbang. Pengeringan oven dilakukan selama 180 menit dengan temperature 105 °C. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan berat kering dari batubara yang nantinya dapat digunakan untuk mengukur *moisture content* yang ada dalam batubara.



**Gambar 3.15** Oven

**n. Kompor dan LPG**

Kompor dan LPG digunakan untuk memanaskan aquades yang ada pada *water tank* yang akan dialirkan ke radiator. Heater yang digunakan tidak mampu menjaga suhu agar tetap konstan, sehingga diperlukan energi panas tambahan berupa api dari kompor.



**Gambar 3.16** Kompor dan LPG

**o. Heater**

*Heater* digunakan untuk memanaskan aquades yang ada pada *water tank*. *Heater* ini akan di sambungkan dengan thermocontrol agar tempetarur dari aquades pada *water tank* tetap konstan.



**Gambar 3.17** *Heater*

## 3.6 Metodologi Eksperimen

### 3.6.1 Tahap Persiapan

1. Pertama yaitu mempersiapkan dan memeriksa peralatan eksperimen dalam kondisi baik, yaitu *Anemometer*, Timbangan digital, *voltage regulator*, kompor gas, *thermocontrol*, RH meter, *thermocouple*, *oven electric* dan *heater*.
2. Mengecek dan memastikan kandungan kadar air (moisture content) batubara berada pada level *low rank* yang memiliki kadar air antara 30% sampai 45%.
3. Melakukan pemecahan batubara menjadi ukuran-ukuran kecil dengan menggunakan palu dan gunting.
4. Kemudian langkah berikutnya adalah melakukan pengayakan batubara dengan ayakan bentuk persegi dengan diameter 5mm dan 10mm. Pertama batubara disaring dengan ayakan berdiameter 10mm lalu disaring kembali dengan ayakan berdiameter 5mm. sehingga hasil terakhir yang didapat adalah ukuran batubara dengan diameter rata-rata  $\pm 6$ mm.
5. Menimbang sampel batubara yang telah disaring, untuk variasi yang diinginkan pada eksperimen ini adalah jumlah beban pengeringan masing-masing yaitu 300gr, 500gr, dan 700gr dengan massa total 1500 gram.
6. Memastikan *thermocouple* terpasang pada titik-titik yang telah di tentukan dan telah terhubung pada *data logger* sehingga data bisa terbaca pada laptop yang sebelumnya telah terinstal *software MX100* yaitu alat untuk data akuisisi.
7. Melakukan pemasangan *blade* dengan sudut  $20^\circ$  pada *drying chamber*. Pertama *cover* dari *drying chamber* dilepas terlebih dahulu, kemudian *blade* dimasukkan dengan *cone* sebagai pusatnya dan dikunci dengan baut yang telah dipasang pada *cone* agar *blade* tidak bergerak saat eksperimen dilakukan. Lalu *cover* dipasang kembali ke *drying chamber*.

8. Menyiapkan pemasangan alat ukur temperatur. Peralatan yang disiapkan yaitu *blade* dengan sudut kemiringan  $20^\circ$ , serta memasang *thermocouple* pada titik saluran masuk dan keluar dari *drying chamber*.
9. Menghitung kecepatan fluidisasi minimum menggunakan persamaan
10. Mengisi tangki air dengan aquades, setelah tangki telah terisi penuh air aquades kemudian air aquades tersebut dipanaskan menggunakan *heater* spiral dengan daya total 3100watt dengan pemakaian sesuai kebutuhan. 1 heater di pasang pada *thermocontrol* untuk menjaga kestabilan temperatur. Temperatur air yang dipanaskan yang diinginkan yaitu  $75^\circ\text{C}$ .
11. Lalu air aquades yang telah dipanaskan pada tangki akan disirkulasikan menuju radiator menggunakan pompa air. Sistem pemanas udara yang digunakan adalah 2 buah *compact heat exchanger* yang disusun seri. *Fan* yang diletakkan sebelum radiator dinyalakan selama proses eksperimen berlangsung, *fan* yang digunakan ada 2 buah masing-masing untuk 1 radiator. Dengan adanya sirkulasi tersebut maka akan terjadi pertukaran panas antara udara sekitar dengan air aquades yang dipanaskan.
12. *Blower* dinyalakan dan mengatur kecepatan udara dengan menggunakan *voltage regulator*. Voltage regulator di-*setting* pada kondisi dimana kecepatan fluidisasi minimum tercapai. Lalu perhitungan kecepatan udara dilakukan dengan menggunakan anemometer, anemometer ini diletakkan pada bagian *inlet drying chamber*. Ditunggu 10 menit agar tercapai kondisi *steady state*.

### 3.6.2 Tahap Pengambilan Data

1. Setelah semua alat eksperimen nyala, ditunggu beberapa saat sampai temperatur udara stabil atau kondisi *steady* pada *drying chamber*.
2. Dilakukan penimbangan awal batubara sebanyak  $\pm 3$  gram menggunakan timbangan digital. Hasilnya dicatat sebagai massa sampel batubara basah awal.
3. Nilai temperatur (T in) dan *relative humidity* (RH in) dalam *drying chamber* dicatat.
4. Menyalakan *software* MX 100 yang telah terinstal pada laptop dilakukan bersamaan dengan memasukkan batubara ukuran  $\pm 6$  mm dengan berat 300 gram ke dalam *chamber*.
5. Dilakukan pengambilan sampel batubara sebanyak  $\pm 3$  gram dengan interval waktu selama 1 menit pada 15 menit awal, kemudian interval 2 menit sebanyak 8 kali.
6. Pada setiap pengambilan sampel, dilakukan pencatatan nilai RH menggunakan RH meter lalu sampel diletakkan pada plastic dan diberi tanda sesuai urutan interval waktu yang telah diurutkan.
7. Setelah tahap pengambilan data selesai maka dilakukan penimbangan sampel menggunakan timbangan digital dan dicatat.
8. Setelah pengambilan data selesai dilakukan pompa, *heater*, *blower*, kompor, dan *fan* pada daerah radiator dimatikan.
9. Lalu sampel batubara diletakkan dalam wadah yang dilapisi aluminium *foil* yang telah disiapkan dan diberikan penanda urutan waktu.
10. Dilakukan proses pengeringan dengan menggunakan *oven*, proses pengeringan ini menggunakan standart ASTM D 5142 yaitu batubara perlu dipanaskan dengan temperatur 105 °C selama 3 jam guna menghilangkan *moisture* secara keseluruhan.

11. Setelah dilakukan proses pengeringan lanjut oleh *oven*, batubara akan ditimbang lagi menggunakan timbangan digital dan kemudian dicatat sebagai massa sampel batubara kering.
12. Selesai.

### 3.6.3 Tahap Analisa Data Eksperimen

Setelah proses pengambilan data dilaksanakan, selanjutnya adalah pengolahan data. Hal yang akan ditinjau yaitu dari segi udara dan segi batubara, dengan masing-masing variabel yang akan didapatkan dari hasil percobaan. Berikut adalah bagan mengenai hal yang akan ditinjau.

Pada tahap pengolahan data, dari sisi udara akan didapatkan variabel  $T_{db\ out}$ ,  $T_{db\ in}$ ,  $Rh_{out}$ ,  $Rh_{in}$ . Dari variabel-variabel tersebut bisa didapatkan proses yang terjadi dalam *psychrometric chart*. Sedangkan dari sisi batubara akan didapatkan variabel  $M_{batubara\ kering}$ ,  $M_{batubara\ basah}$ . Dari variabel-variabel tersebut akan didapatkan grafik *moisture content* fungsi waktu dan laju pengeringan fungsi waktu.

### 3.7 Lembar Pengambilan Data

Untuk lembar pengambilan data pada eksperimen ini dapat membantu proses dalam setiap data yang diperlukan. Berikut adalah lembar pengambilan data yang digunakan :

**Tabel 3.1** Lembar Data Percobaan

Waktu (menit)	V (m/s)	T1 (inlet)	T2 (outlet)	RH inlet (%)	RH outlet (%)	Massa batubara basah (gr)	Massa batubara kering (gr)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
23							
25							
27							
29							
31							

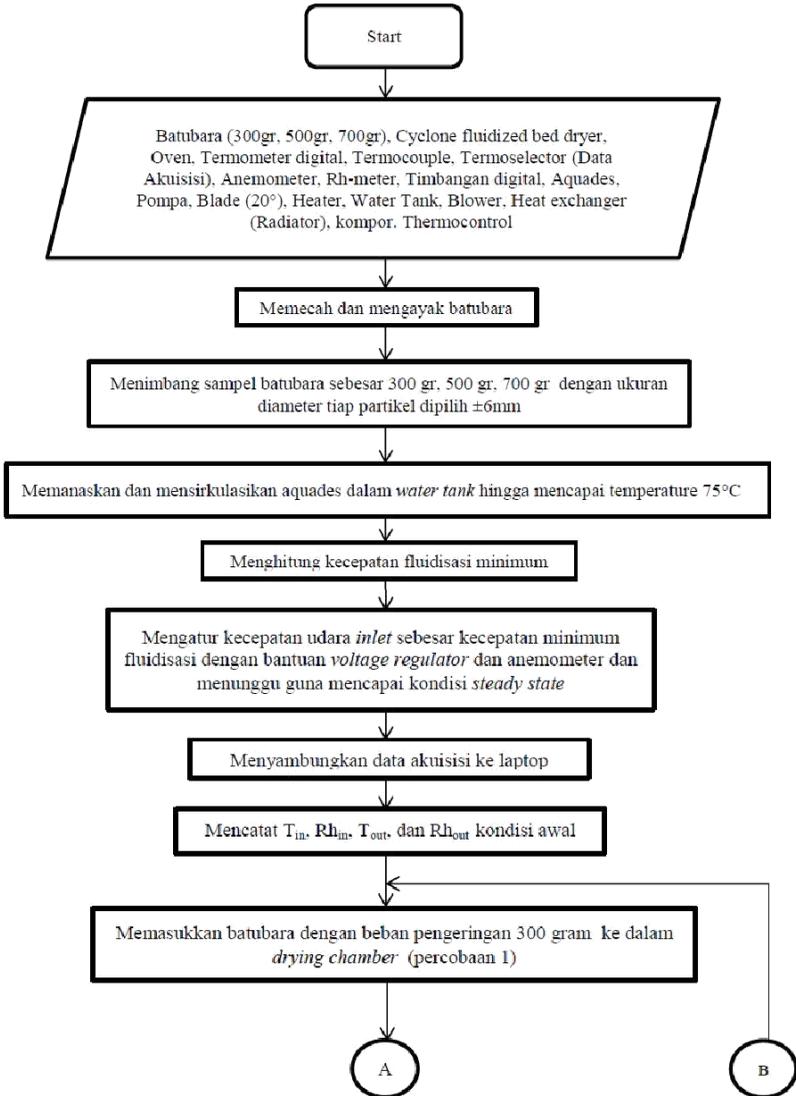
### **3.8 Luaran Penelitian**

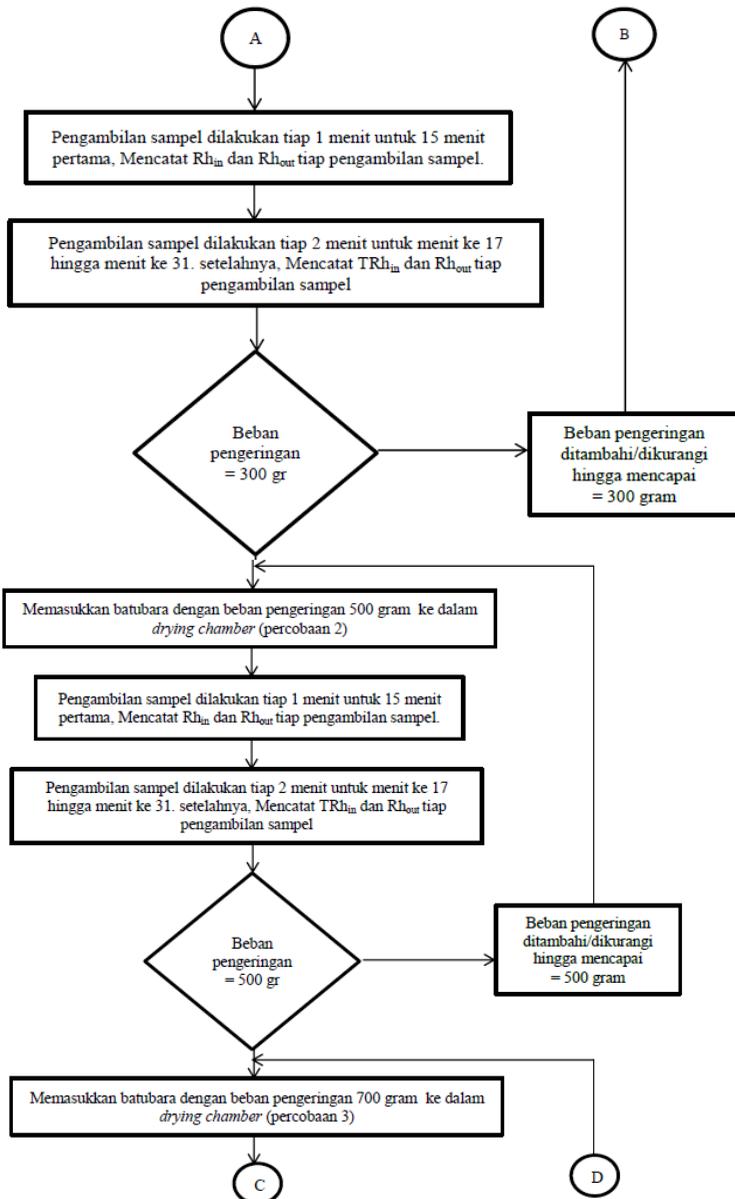
Dalam luaran penelitian ini adalah hasil yang ingin didapatkan dari eksperimen dalam bentuk data, yang nantinya data tersebut akan diolah dengan perhitungan guna mendapatkan hasil. Untuk data yang didapatkan tercantum pada tabel 3.1 diatas, kemudian data diolah dan digrafikkan sebagai berikut :

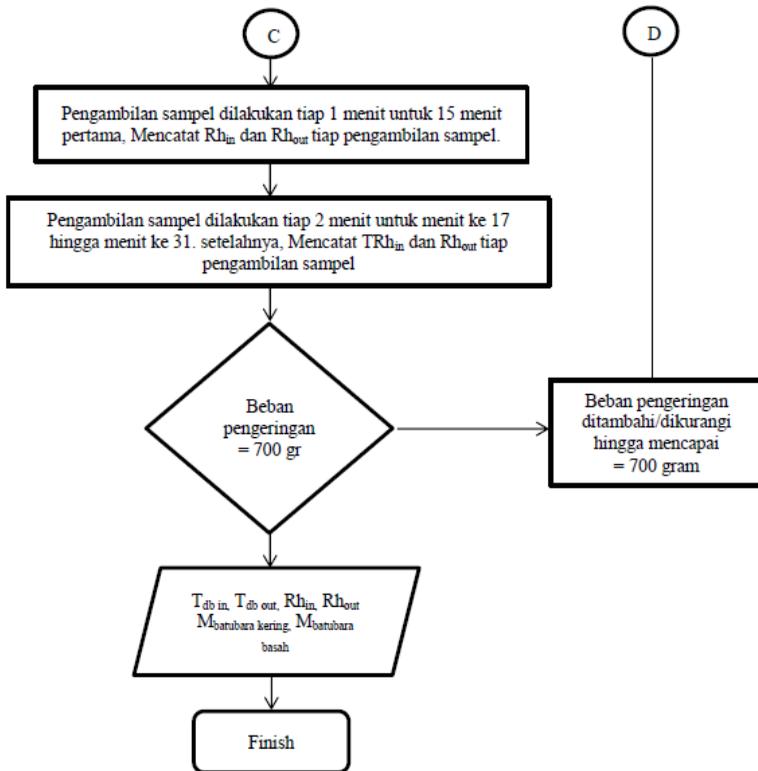
- Tdb in, Tdb out, Rh in, Rh out, Mbatubara kering, Mbatubara basah
- Grafik (drying rate vs waktu, MC vs waktu, berat basah vs waktu, berat kering vs waktu, selisih massa vs waktu)
- Grafik (Tdb out vs waktu, Rh out vs waktu, Perbandingan uap air vs waktu)
- Diagram psikometrik

### 3.9 Flowchart Eksperimen

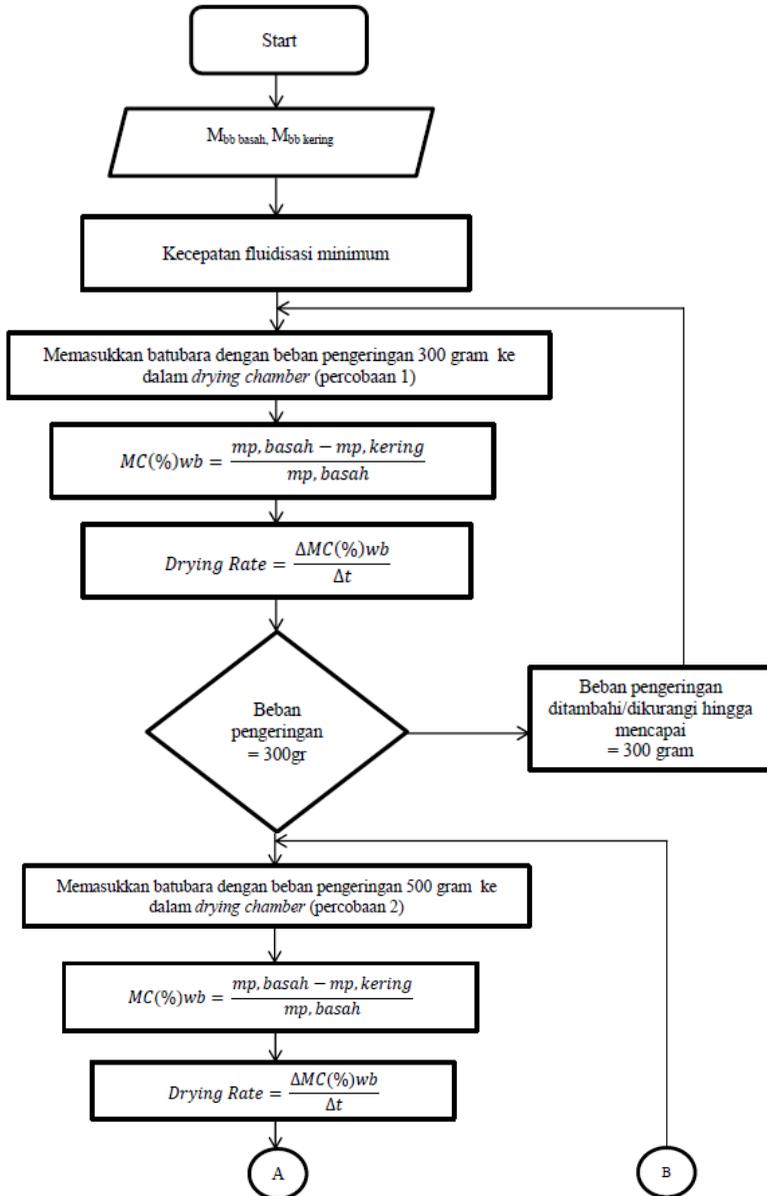
#### 3.9.1 Flowchart pengambilan data

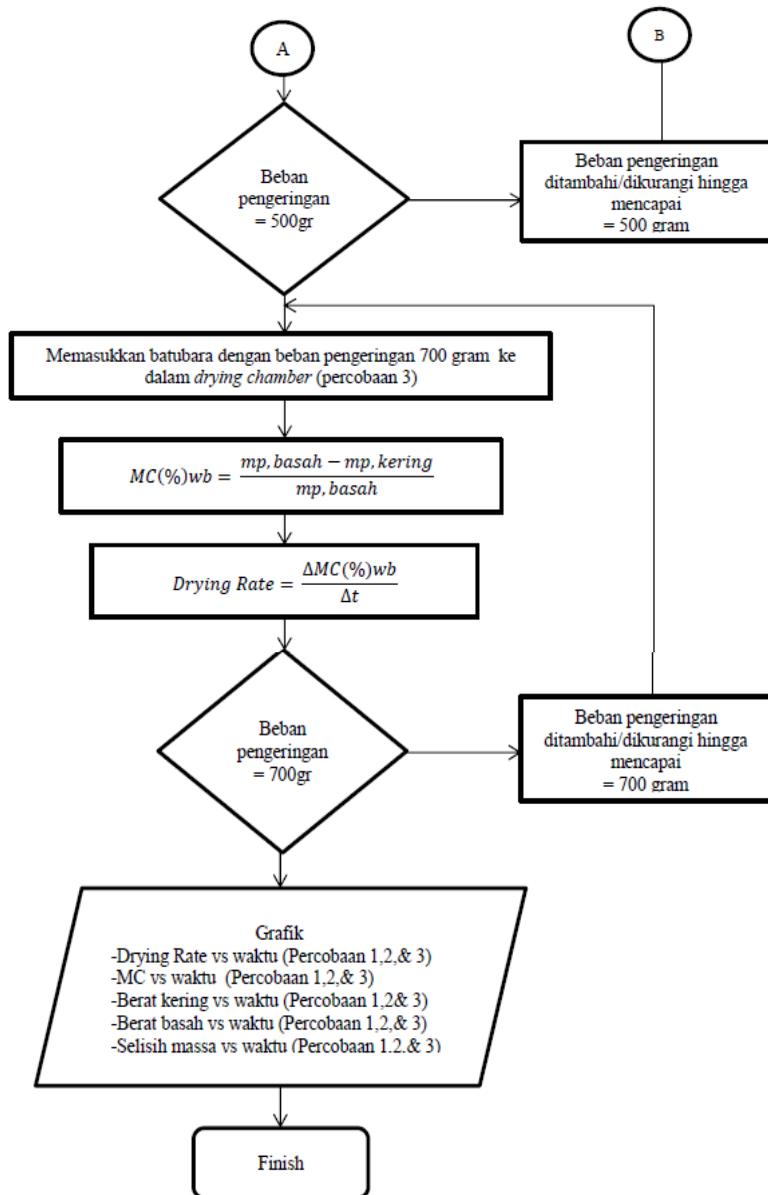




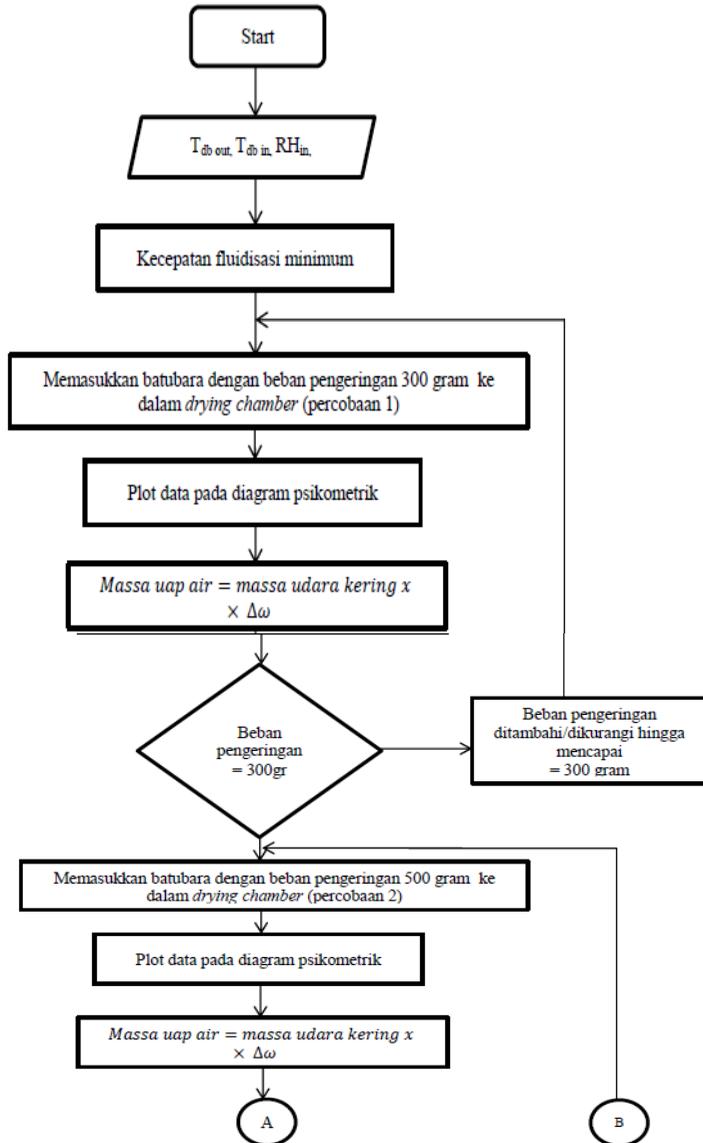


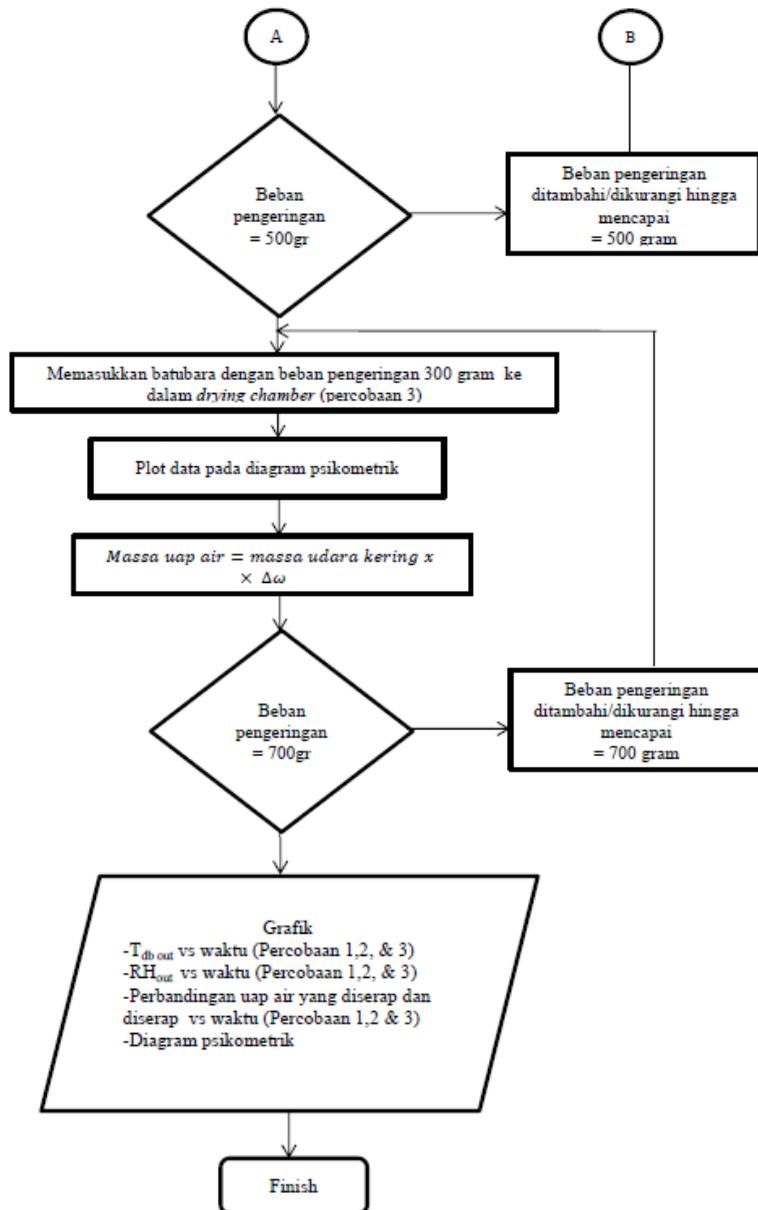
### 3.9.2 Flowchart pengolahan data dari batubara





### 3.9.3 Flowchart pengolahan data dari udara





## **BAB IV**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

Pada proses eksperimen pengeringan batubara jenis *low rank* dengan menggunakan prinsip *cyclone coal dryer* dengan menggunakan sudut blade  $20^\circ$  serta memvariasikan beban pengeringan 300 gram, 500 gram, dan 700 gram, dari hasil pengambilan data yang dilakukan didapatkan data yang dicatat dalam tabel data eksperimen. Data yang diperoleh tersebut berfungsi sebagai input yang nantinya akan diolah pada tahap pengolahan data hasil eksperimen, sehingga nantinya menghasilkan output dalam bentuk grafik dan *psychrometric chart*. Untuk mengetahui nilai *moisture content* maka terlebih dahulu akan dicari nilai *ratio humidity*, nilai *ratio humidity* ini akan mengacu kepada nilai temperatur *outlet* ( $T_{db}$ ) dan *relative humidity* (Rh) dari hasil pengambilan data eksperimen. Hasil yang diharapkan untuk *moisture content* adalah besarnya sama antara yang dilepas batubara dan diterima oleh udara pengering. Pada proses pengeringan ada dua proses utama yang menjadi tinjauan utama yaitu proses perpindahan uap air dari batubara dan proses penyerapan uap air oleh udara, dengan melalui proses perpindahan panas dan massa secara berurutan sebagai berikut :

1. Perpindahan massa uap air dari dalam batubara menuju bagian permukaan terjadi secara kapiler
2. Perpindahan uap air dari bagian permukaan batubara ke bagian udara pengering
3. Perpindahan panas antara bagian permukaan batubara dengan udara pengering terjadi secara konveksi
4. Perpindahan panas dari bagian permukaan menuju dalam batubara terjadi secara konduksi

#### **4.1 Data Hasil Eksperimen**

Data hasil eksperimen ini tercantum pada lampiran hasil eksperimen proses pengeringan batubara.

## 4.2 Analisa dan Contoh Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan yang dilakukan untuk eksperimen yang telah dilakukan. Data yang digunakan untuk contoh perhitungan adalah sebagai berikut :

- $\rho$  batubara : 1300 kg/m<sup>3</sup>
- $\rho$  udara : 1,122 kg/m<sup>3</sup>
- Gaya gravitasi (g) : 9,81 m/s<sup>2</sup>
- Koefisien drag batubara (Cd) : 0,47 (batubara dianggap bulat)
- Diameter batubara : 6 mm

### 4.2.1 Perhitungan Kecepatan Fluidisasi

$$\Sigma F = 0$$

$$Fd + Fb - W = 0$$

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

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

$$V = \sqrt{\frac{2 \times 852 \frac{kg}{m^3} \times \frac{4}{3} \pi (0,003)^3 \times 9,81 \frac{m}{s^2}}{0,47 \times 1,122 \frac{kg}{m^3} \times \frac{\pi}{4} (0,006)^2 \sin 20}}$$

$$V = 4,4 \text{ m/s}$$

### 4.2.2 Contoh Perhitungan *Moisture Content* Pada Sisi Batubara

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan data yang dapat digunakan mengetahui *moisture content*. *Moisture content* sendiri adalah perbandingan antara berat air yang terkandung dalam bahan dengan berat kering bahan tersebut.

Dalam menentukan berat kering pada bahan dilakukan penimbangan sampai dengan berat tersebut tidak mengalami perubahan lagi selama proses pengeringan. Satuan untuk nilai *moisture content* adalah persen (%), dibawah ini adalah contoh untuk perhitungan *moisture content* dengan menggunakan data pada menit ke-1 dan ke-2 :

**Tabel 4.1** Data perhitungan *moisture content* untuk batubara

Keterangan	Nilai	Satuan
Sudut blade	20	Angle
Beban pengeringan	700	Gram
Waktu pengeringan	1	Menit
Massa batubara kering menit ke-1	2,98	Gram
Massa batubara basah menit ke-1	4,08	Gram
Massa batubara kering menit ke - 2	2,85	Gram
Massa batubara basah menit ke-2	3,79	Gram
Massa tempat pengeringan menit ke-1	0,91	Gram
Massa tempat pengeringan menit ke-2	0,89	Gram

- *Moisture Content* pada menit ke-1 :

$$M. C (1) = \frac{(mb1-mk1)}{mk1-mt1} \times 100\%$$

$$M. C (1) = \frac{(4,08 - 2,98)}{2,98 - 0,91} \times 100\%$$

$$M. C (1) = 34,700 \%$$

- *Moisture Content* pada menit ke-2 :

$$M. C (2) = \frac{(mb2-mk2)}{mk2-mt2} \times 100\%$$

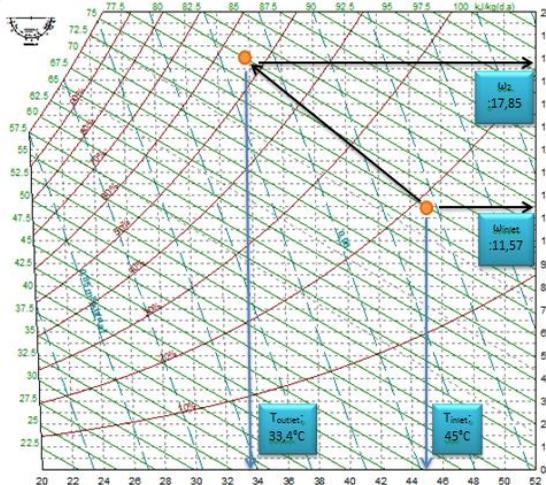
$$M.C(2) = \frac{(3,79, -2,85)}{2,85 - 0,89} \times 100\%$$

$$M.C(2) = 32,413 \%$$

#### 4.2.3 Contoh Perhitungan *Humidity Ratio* Pada Sisi Udara

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan data temperature outlet ( $T_{db}$ ) dan relative humidity (Rh) yang digunakan untuk mengetahui *humidity ratio* untuk menit tertentu. *Humidity ratio* ini digunakan menghitung massa uap air yang dilepas oleh batubara selama proses pengeringan dilakukan yang akan dibandingkan dengan massa uap air yang diterima oleh udara pengering. Dalam mencari rasio kelembaban digunakan *psychrometric chart*.

Rh <sub>out1</sub>	54,7
T <sub>out1</sub>	33,4



**Gambar 4.1** Diagram psikometrik untuk mencari *humidity ratio* % per menit

Massa air yang diterima oleh udara pengering dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$n_A = (w_1 - w_2) \cdot \dot{m}_{udara}$$

Dimana :

$(W_1 - W_2)$  = Selisih humidity ratio udara (gr/kg)

$\dot{m}_{udara}$  = Laju aliran massa udara (kg/s)

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \omega_2 - \omega_{inlet} \\ &= 17,85 \frac{g}{kg} - 11,57 \frac{g}{kg} \\ &= 6,78 \frac{g}{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_A &= \dot{m}_{udara} \cdot \Delta\omega \\ &= 0,04028 \text{ kg/s} \cdot 6,78 \text{ g/kg} \\ &= 0,2731 \text{ gram/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{massa udara} &= \dot{m} \times \text{interval pengeringan} \\ &= 0,04028 \text{ kg/s} \times 60 \text{ s} \\ &= 2,4171 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{massa uap air diterima udara} &= \Delta\omega \times \text{massa udara} \\ &= 6,78 \frac{g}{kg} \times 2,4171 \text{ kg} \\ &= 16,387 \text{ gram} \end{aligned}$$

#### 4.2.4 Contoh Perhitungan Drying Rate

Dalam perhitungan *drying rate* ini digunakan untuk mengetahui *moisture content* yang hilang dari batubara per satuan waktu, dimana nantinya akan diplotkan dalam grafik. *Drying rate* sendiri adalah waktu yang dibutuhkan untuk menghilangkan *moisture content* dalam batubara pada waktu tertentu. Data yang digunakan untuk perhitungan *drying rate* ini dengan

menggunakan data dari perhitungan *moisture content* (4.2.1) sebagai berikut :

$$\text{M.C 1} = 34,700 \%$$

$$\text{M.C 2} = 32,413 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Drying Rate} &= \frac{MC\ 1 - MC\ 2}{t_1 - t_2} \\ &= \frac{34,700 - 32,413}{1} \\ &= 2,28658 \text{ \%/menit} \end{aligned}$$

#### 4.2.5 Contoh Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Dalam proses perpindahan panas yang terjadi dimana perpindahan panas berpindah menuju dalam batubara dari udara pengering, proses perpindahan ini terjadi secara konveksi sedangkan untuk perpindahan massa yang terjadi dimana perpindahan massa berpindah menuju udara pengering dari uap air yang terkandung dalam batubara. Di dalam masing-masing proses tersebut terdapat koefisien yang digunakan untuk menentukan besarnya massa ataupun panas yang mengalami perpindahan antara batubara dan udara pengering. Untuk proses pengeringan yang sedang berlangsung perpindahan massa dan panas ini terjadi dalam waktu hampir bersamaan. Untuk menentukan laju perpindahan massa dalam percobaan dengan ketiga variasi beban maka digunakan data laju perpindahan massa untuk 5 menit pertama seperti pada tabel dibawah ini :

**Tabel 4.2** Data Laju Perpindahan Massa

waktu	300 gr	500 gr	700 gr
1menit	0.2580 gr/sekon	0.2714 gr/sekon	0.2731 gr/sekon
1menit	0.207 gr/sekon	0.2203 gr/sekon	0.2066 gr/sekon
1menit	0.1595 gr/sekon	0.1857 gr/sekon	0.1636 gr/sekon

1menit	0.119 gr/sekon	0.1422 gr/sekon	0.1266 gr/sekon
1menit	0.1052 gr/sekon	0.1141 gr/sekon	0.1191 gr/sekon

- a) Menghitung nilai laju perpindahan rata-rata pada lima menit pertama :

Beban 300 gram

$$\begin{aligned} n_A &= 0,16977 \frac{\text{gr}}{\text{sekon}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ gr}} \\ &= 1,6977 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Beban 500 gram

$$\begin{aligned} n_A &= 0,18681 \frac{\text{gr}}{\text{sekon}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ gr}} \\ &= 1,8681 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Beban 700 gram

$$\begin{aligned} n_A &= 0,17784 \frac{\text{gr}}{\text{sekon}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ gr}} \\ &= 1,7784 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Dalam eksperimen ini digunakan batubara dengan bentuk granular berupa bola dengan diameter sebesar 6mm.

- b) Menghitung volume batubara :

$$\begin{aligned} \text{Volume batubara} &= 4/3 \pi \cdot r^3 \\ &= 4/3 \pi (0,003\text{m})^3 \\ &= 1,1304 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- c) Menghitung massa batubara :

$$m = \rho_{\text{coal}} \cdot V_{\text{coal}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1300 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,1304 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \\
 &= 1,46952 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \\
 &= 0,146952 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

- d) Menghitung jumlah sampel batubara berdasarkan berat sampel batubaranya :

$$n = m_{\text{sampel}} / m_{\text{batubara}}$$

Beban 300 gram

$$\begin{aligned}
 n &= 300 \text{ gram} / 0,146952 \text{ gram} \\
 &= 2041 \text{ biji}
 \end{aligned}$$

Beban 500 gram

$$\begin{aligned}
 n &= 500 \text{ gram} / 0,146952 \text{ gram} \\
 &= 3405 \text{ biji}
 \end{aligned}$$

Beban 700 gram

$$\begin{aligned}
 n &= 700 \text{ gram} / 0,146952 \text{ gram} \\
 &= 4763 \text{ biji}
 \end{aligned}$$

Untuk membandingkan nilai koefisien perpindahan massa yang terjadi, perlu ditentukan besarnya nilai koefisien perpindahan massa pada kecepatan udara pengering yang konstan. Dari eksperimen dapat diketahui untuk parameter sebagai berikut :

**Tabel 4.3** Data perhitungan koefisien perpindahan massa dan panas

Keterangan	Nilai	Satuan
Ukuran partikel	6	mm
Sudut blade	20	Angle

Kecepatan	4.4	m/s
Temperatur permukaan batubara	28	°C
Massa jenis air pada permukaan batubara	0,02699	kg/m <sup>3</sup>
Massa jenis air pada udara pengering	0,01175	kg/m <sup>3</sup>

e.) Menghitung nilai koefisien perpindahan massa untuk masing-masing variasi beban :

Beban 300 gram

$$n_A = h_m \cdot A \cdot n \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,in})$$

$$hm = \frac{1,6977 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{4\pi \cdot (0,003)^2 \cdot 2041 \cdot ((0,02699 - 0,01175))}$$

$$= 0,04828 \text{ m/s}$$

Beban 500 gram

$$n_A = h_m \cdot A \cdot n \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,in})$$

$$hm = \frac{1,8681 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{4\pi \cdot (0,003)^2 \cdot 3403 \cdot ((0,02699 - 0,01175))}$$

$$= 0,03186 \text{ m/s}$$

Beban 700 gram

$$n_A = h_m \cdot A \cdot n \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,in})$$

$$hm = \frac{1,7784 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{4\pi \cdot (0,003)^2 \cdot 4763 \cdot ((0,02699 - 0,01175))}$$

$$= 0,02167 \text{ m/s}$$

f.) Menghitung Reynolds Number ( $Re_D$ )

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

$$Re_D = \frac{1,122 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,006 \text{ m}}{192,44 \times 10^{-7} \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}} = 1539,2$$

g.) Menghitung Nusselt Number ( $Nu_D$ )

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

$$= 2 + 0,6 \times 1539,2^{1/2} \times 0,711^{1/3}$$

$$= 2 + 35,487 \times 0,89$$

$$Nud = 23,0304$$

h.) Menghitung Schmidt number ( $Sc$ )

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

$$Sc = \frac{0,00001726}{0,00002805}$$

$$Sc = 0,6153$$

i.) Menghitung Sherwood Number (Sh)

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

$$Sh = 0,037 \times 1539,2^{\frac{1}{2}} \times 0,6153^{\frac{1}{3}}$$

$$Sh = 22,025$$

j.) Nilai koefisien perpindahan massa konveksi ( $h_m$ )

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

$$h_m = 22,025 \cdot \left( \frac{0,00002805}{0,006} \right)$$

$$h_m = 0,10297 \text{ m/s}$$

k.) Nilai koefisien perpindahan panas (h)

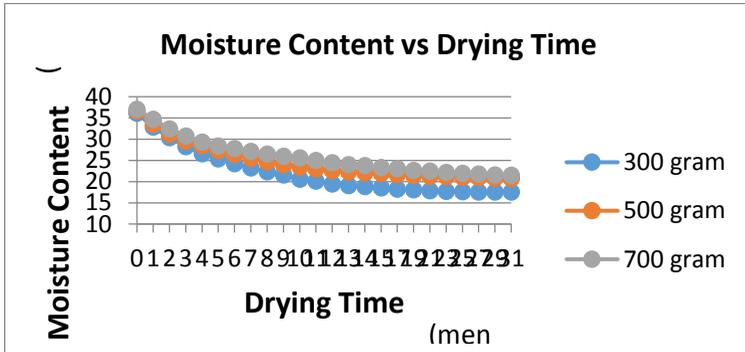
$$h = Nu_D \times \frac{k}{D}$$

$$h = 23,0304 \times \frac{0,0274}{0,006}$$

$$h = 104,988 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### 4.3 Analisa Hasil dan Pembahasan dari Sisi Batubara

#### 4.3.1 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap *Moisture Content* Fungsi *Drying Time*



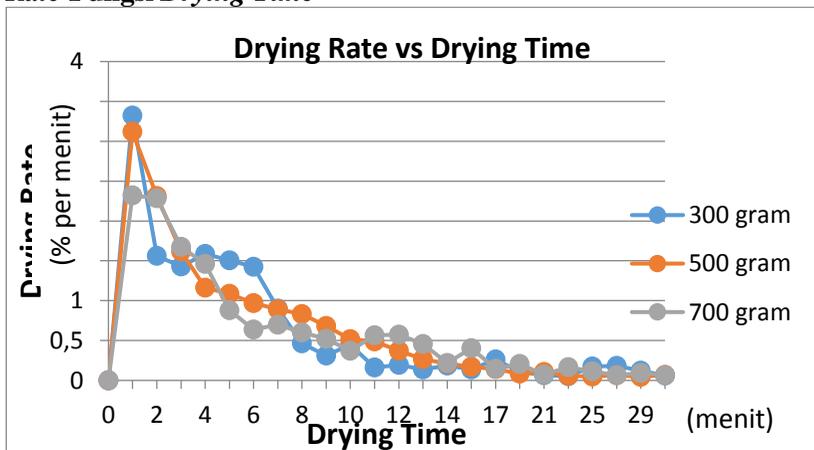
**Gambar 4.2** Pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* fungsi *drying time*

Pada gambar 4.2 ditunjukkan grafik pengaruh beban pengeringan terhadap *moisture content* fungsi *drying time*. Dapat dilihat pada menit ke-0 dengan beban pengeringan 300 gram terjadi penurunan nilai *moisture content* dari 36,154 % menjadi 32,831 %, beban pengeringan 500 gram terjadi penurunan nilai *moisture content* dari 36,655 % menjadi 33,537 %, dan beban pengeringan 700 gram terjadi penurunan nilai *moisture content* dari 37,023 % menjadi 34,700 %. Dan juga dapat dilihat trend dari grafik diatas menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai *moisture content* yang signifikan terhadap *drying time*, dimana pada jumlah beban pengeringan sebesar 300 gram mengalami penurunan nilai *moisture content* paling cepat, dan diikuti dengan beban pengeringan 500 gram serta 700 gram. Pada tujuh menit pertama untuk masing-masing nilai beban pengeringan yang digunakan menunjukkan penurunan *moisture content* yang cukup

besar, akan tetapi pada menit ke-11 dan setelahnya penurunan nilai *moisture content* cenderung lebih kecil.

Beban pengeringan mempengaruhi laju *drying rate*, hal ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada permukaan batubara. Daya serap menurun maka laju pengeringan akan menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah beban yang lebih kecil. Lalu pengaruh dari hubungan antara variasi beban dengan nilai koefisien perpindahan massa, dimana semakin banyak jumlah beban pengeringan maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan massanya. Koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi laju perpindahan massa  $n''_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$ .

#### 4.3.2 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap *Drying Rate* Fungsi *Drying Time*



**Gambar 4.3** Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi *drying time*

Pada gambar 4.3 menunjukkan grafik *drying time* terhadap waktu pengeringan dengan variasi beban pengeringan 300 gram, 500 gram dan 700 gram. Dapat dilihat pada grafik, trend yang terjadi menunjukkan penurunan nilai *drying rate* yang cukup signifikan terjadi pada menit ke-1 sampai dengan menit ke-9. Untuk beban pengeringan 300 gram mempunyai nilai *drying rate* sebesar 3,3225 % per menit, lalu beban pengeringan 500 gram mempunyai nilai *drying rate* sebesar 3,1182 % per menit, dan beban pengeringan 700 gram mempunyai nilai *drying rate* sebesar 2,3225 % per menit. Namun setelah menit ke-9 yang terjadi pada penurunan *drying rate* sudah tidak lagi signifikan dan setelah menit ke-17 nilai dari *drying rate* cenderung lebih konstan. Nilai *drying rate* terbesar terdapat pada beban pengeringan 300 gram.

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

perpindahan massa akan mempengaruhi laju perpindahan massa  
 $n''_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$ .

#### 4.4 Analisa Hasil dan Pembahasan dari Sisi Udara

##### 4.4.1 Analisa Udara pengering Pada Diagram Psikometrik

**Tabel 4.4** RH out dan Temperatur pada beban pengeringan 300 gram, 500 gram, dan 700 gram

t	300 gram		500 gram		700 gram	
	T.outlet	RH out	T.outlet	RH out	T.outlet	RH out
(Menit)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
0	43,6	20,3	43,5	20,2	43,2	20,2
1	34,9	50,1	34,2	52,7	33,4	54,7
2	35,3	45,6	34,6	48	33,9	48,4
3	35,7	41,5	35	44,6	34,5	43,8
4	36	38,2	35,5	40,5	34,9	40,3
5	36,4	36,5	35,8	38	35,4	38,7
6	36,7	35,5	36,2	36,2	35,9	36,6
7	36,9	34,5	36,6	34,7	36,4	35,5
8	37,3	33,7	36,9	33,7	36,8	34
9	37,5	33,1	37,3	32,5	37,3	32,7
10	37,8	32,2	37,7	31,3	37,7	31,3
11	38,1	31,4	38,1	30,1	38,3	30,2
12	38,4	30,4	38,4	29,5	38,4	29,3

13	38,6	29,2	38,7	28,2	39,1	28,1
14	38,8	28,6	39	27,7	39,5	27,4
15	39	28,1	39,1	27,3	39,6	27,2
17	39,3	27,3	39,2	27,1	39,7	26,8
19	39,5	26,7	39,7	26,3	39,9	26,2
21	39,7	26	39,9	26	40,1	25,7
23	39,9	25,5	40,1	25,4	40,3	25,3
25	40	25,2	40,2	25,1	40,4	25,1
27	40,1	24,9	40,3	24,8	40,5	24,9
29	40,2	24,6	40,4	24,6	40,6	24,7
31	40,2	24,4	40,5	24,3	40,6	24,3

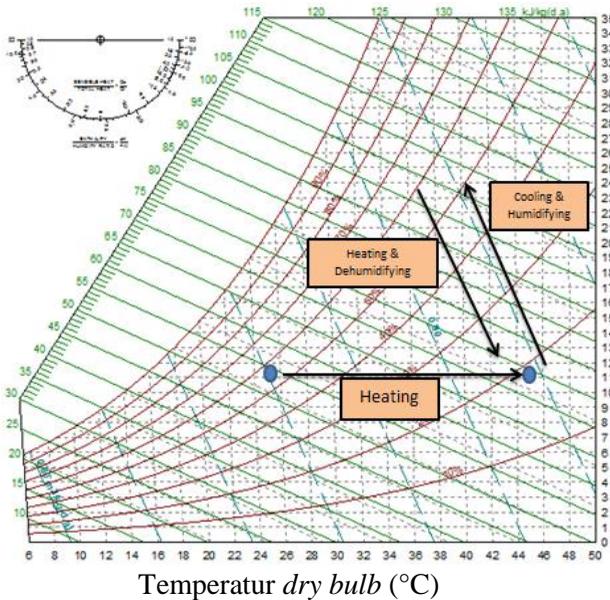
Dalam proses pengeringan terdapat 2 proses utama yaitu proses perpindahan panas dan perpindahan massa. Saat proses pengeringan berlangsung moisture content dalam batubara akan terus berkurang, hal ini juga menyebabkan massa dari batubara berkurang. Agar proses perpindahan massa uap air dari batubara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

1. Saat suhu udara pengering panas maka akan mempunyai nilai relative humidity yang rendah, hal ini akan lebih mudah untuk udara pengering menyerap uap air dari batubara.
2. Ketika udara pada bagian permukaan batubara lebih panas dibandingkan bagian dalam batubara maka akan terjadi perbedaan tekanan sampai dengan uap air akan bergerak menuju bagian permukaan batubara

3. Adanya perbedaan temperatur antara udara pengering dan batubara, udara pengering yang digunakan mempunyai temperatur lebih tinggi dari batubara agar prose perpindahan panas dapat terjadi.

Untuk analisa yang ditinjau dari sisi udara digunakan diagram psikometrik, data yang didapatkan akan dianalisa dengan diagram psikometrik yaitu nilai *relative humidity* sisi keluaran ( $RH_{out}$ ) dan temperature sisi keluaran ( $T_{out}$ ). Nantinya akan diplot untuk mendapatkan *humidity ratio* ( $\omega$ ), nilai nilai *humidity ratio* ( $\omega$ ) ini akan digunakan untuk menentukan besarnya uap air yang berpindah menuju udara pengering.

Dalam gambar 4.4 dibawah ditunjukkan proses pengeringan yang terjadi pada batubara, dimana batubara mengalami beberapa fase selama proses pengeringan berlangsung. Pertama yaitu fase proses pemanasan (*heating*), pada fase ini udara bebas dipanaskan menggunakan *heat exchanger* yang tersusun secara seri yang nantinya udara bebas akan mendapatkan panas agar lebih maksimal saat digunakan untuk proses pengeringan. Fase kedua yaitu fase *humidifying* dan *cooling*, fase ini terjadi saat batubara dimasukkan kedalam *drying chamber* dimana saat itu terjadi penurunan temperatur udara karena terjadi perpindahan panas anatara batubara dengan udara. Dalam proses pengeringan ini, tidak hanya perpindahan panas yang terjadi tetapi juga perpindahan massa yaitu proses perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering. Dengan berjalannya waktu, temperatur dari batubara dan udara akan mengalami kesetimbangan, fase selanjutnya adalah *heating* dan *humidifying*. Fase *humidifying* ini adalah proses penambahan uap air pada udara, karena hal ini maka terjadi kenaikan *humidity ratio* dan entalpi, nilai *relative humidity* akan turun ketika temperatur udara meningkat.

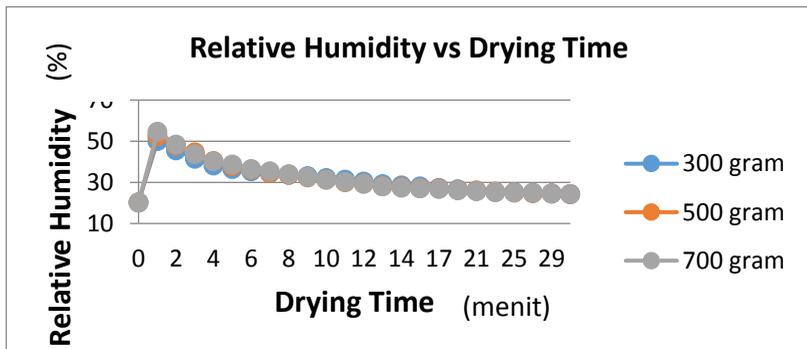


**Gambar 4.4** Proses pengeringan batubara dalam diagram psikometrik

#### 4.4.2 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap *Relative Humidity* Fungsi *Drying Time*

Pada gambar 4.5 dibawah dapat dilihat grafik pengaruh beban pengeringan terhadap *relative humidity* sebagai fungsi waktu. Jumlah uap air yang terdapat didalam campuran antara air dengan udara pada fase gas disebut *relative humidity*. Dari gambar ditunjukkan trendline untuk besarnya nilai *relative humidity* dari udara pada posisi keluaran *drying chamber* dimana digunakan variasi beban pengeringan yaitu 300 gram, 500 gram dan 700 gram. Pada variasi beban pengeringan 300 gram didapatkan nilai *relative humidity* dari 50,1 % pada menit ke-1 sampai dengan 24,4 % pada menit ke-31. Pada variasi beban pengeringan 500 gram didapatkan nilai *relative humidity* dari 52,7 % pada menit ke-1 sampai dengan 24,3 % pada menit ke-31. Pada

variasi beban pengeringan 700 gram didapatkan nilai *relative humidity* dari 54,7 % pada menit ke-1 sampai dengan 24,3 % pada menit ke-31. Untuk nilai *relative humidity* pada setiap variasi yang digunakan mempunyai kecenderungan mendekati nilai *relative humidity* awal dari udara pengering. Penurunan dari nilai *relative humidity* terjadi secara signifikan pada menit-menit awal lalu *relative humidity* cenderung konstan pada menit-menit akhir.



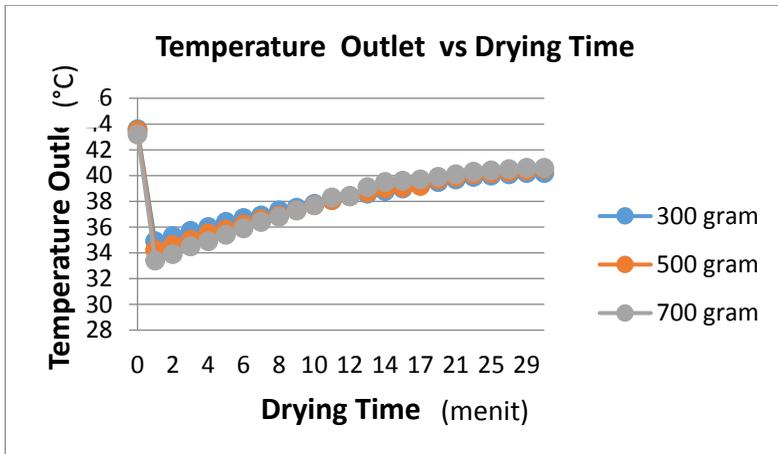
**Gambar 4.5** Pengaruh beban pengeringan terhadap *relative humidity* fungsi *drying time*

Terjadinya penurunan yang terjadi pada *relative humidity* untuk setiap variasi beban pengeringan menandakan adanya perubahan massa uap air yang ada di udara pengering. Perubahan nilai *relative humidity* disebabkan oleh adanya *moisture content* yang berpindah ke udara pengering dari batubara selama proses pengeringan. Untuk beban pengeringan yang besar memiliki nilai *relative humidity* yang besar, dan juga sebaliknya. Hal ini dikarenakan jumlah massa air yang terdapat pada batubara semakin banyak, berbeda bila dibandingkan dengan jumlah beban pengeringan 500 gram dan 300 gram. Untuk beban 500 gram dan 300 gram memiliki nilai *relative humidity* lebih kecil dikarenakan ketika udara melewati permukaan batubara jumlah massa uap air pada kedua beban tersebut lebih sedikit. Sehingga massa uap air yang terserap oleh udara juga menjadi

lebih sedikit. Dari grafik ini dapat diketahui bahwa laju perpindahan massa paling cepat terjadi pada menit-menit awal, laju perpindahan massa dari batubara menuju udara pengering dipengaruhi oleh luas permukaan batubara, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Hubungan antara laju perpindahan massa dengan luas permukaan batubara  $n''_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$ , dimana dapat diketahui luas permukaan berbanding lurus dengan laju perpindahan massa. Untuk jumlah beban pengeringan yang semakin besar mengindikasikan bahwa luas permukaan yang dilewati udara pengering semakin besar dengan ukuran batubara yang sama.

#### **4.4.3 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap Temperatur Udara Keluar *Drying Chamber* Fungsi *Drying Time***

Dalam gambar 4.6 dibawah terlihat dengan variasi beban pengeringan menunjukkan trend penurunan pada menit awal lalu naik sampai dengan menit akhir. Pada beban pengeringan 700 gram mempunyai temperatur sebesar 33,4 °C pada menit ke-1 dan mempunyai temperatur sebesar 40,6 °C pada menit ke-31, beban pengeringan 500 gram mempunyai temperatur sebesar 34,2 °C pada menit ke-1 dan mempunyai temperatur sebesar 40,5 °C pada menit ke-31, serta beban pengeringan 300 gram mempunyai temperatur sebesar 34,9 °C pada menit ke-1 dan mempunyai 40,2 °C pada menit ke-31.



**Gambar 4.6** Pengaruh beban pengeringan terhadap temperatur udara keluar *drying chamber* fungsi *drying time*

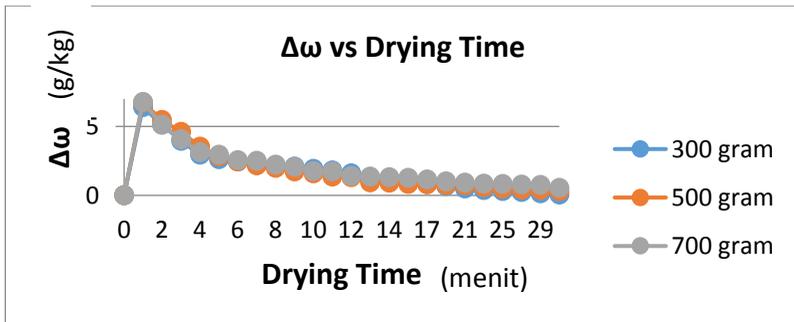
Yang terjadi pada menit awal trend untuk setiap variasi beban pengeringan menunjukkan kenaikan temperatur, akan tetapi setelah menit ke-25 trend temperatur relatif konstan. Untuk data temperatur inlet sebesar 45 °C yang diberikan konstan.

Pada grafik temperatur dalam fungsi waktu dapat diketahui bahwa untuk beban pengeringan 300 gram memiliki nilai temperatur keluaran *drying chamber* paling tinggi diikuti dengan beban pengeringan 500 gram dan 700 gram. Tinggi rendahnya nilai temperatur keluaran dari *drying chamber* dipengaruhi oleh kandungan massa air yang terdapat pada batubara. Semakin besar jumlah beban pengeringan maka dibutuhkan panas yang besar dikarenakan kandungan massa air pada batubara juga lebih besar. Kenaikan temperatur yang terjadi dikarenakan adanya transfer panas dari udara pengering dengan permukaan batubara, dari hubungan antara nilai kalor dengan selisih temperatur permukaan batubara dengan temperatur udara pengering berbanding lurus  $q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$ , pada saat awal proses pengeringan cukup besar dikarenakan perbedaan

temperatur antara udara pengering dan permukaan batubara. Lalu seiring dengan berjalannya proses pengeringan, menyebabkan selisih temperatur antara permukaan batubara dan udara pengering menjadi lebih kecil. Karena selisih perbedaan temperatur ini semakin kecil maka kalor yang ditransfer juga semakin kecil.

#### 4.4.4 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap Selisih *Humidity Ratio* ( $\Delta\omega$ ) Fungsi *Drying Time*

Pada gambar 4.8 dibawah ditunjukkan grafik pengaruh beban pengeringan terhadap humidity ratio fungsi drying time dengan variasi beban pengeringan 300 gram, 500 gram dan 700 gram. *Humidity ratio* sendiri adalah massa air yang terkandung pada setiap kilogram udara kering, untuk *humidity ratio* udara dapat ditentukan berdasarkan 1 kilogram udara kering.



**Gambar 4.7** Pengaruh beban pengeringan terhadap *humidity ratio* ( $\Delta\omega$ ) fungsi *drying time*

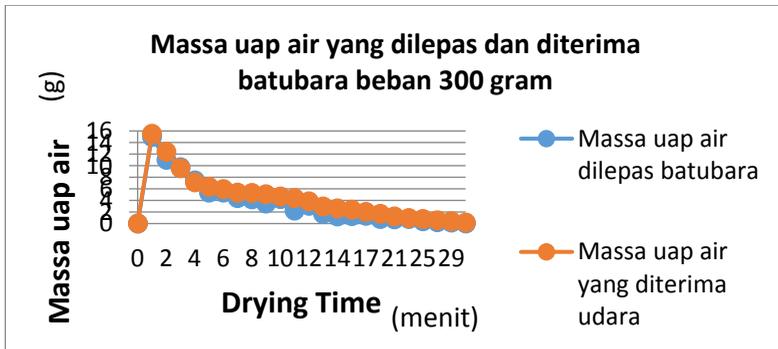
Pada gambar diatas memiliki trend menurun untuk setiap variasi beban pengeringan. Untuk variasi beban pengeringan 700 gram mempunyai penurunan *humidity ratio* paling cepat dibandingkan beban pengeringan lainnya. Udara yang menerima uap air terus berkurang seiring berjalannya waktu saat proses pengeringan, pada beban pengeringan 300 gram nilai *humidity ratio* ( $\Delta\omega$ ) mengalami penurunan lebih tinggi jika

dibandingkan dengan beban pengeringan 500 gram dan 700 gram. Beban pengeringan 300 gram mempunyai nilai *humidity ratio* ( $\Delta\omega$ ) sebesar 6,4062 g/kg pada menit ke-1, beban pengeringan 500 gram mempunyai nilai *humidity ratio* sebesar 6,739 g/kg, dan beban pengeringan 700 gram mempunyai nilai *humidity ratio* sebesar 6,7801 g/kg.

Yang terjadi pada menit ke-1 sampai dengan menit ke-7 *humidity ratio* mengalami penurunan yang signifikan, hal ini dikarenakan proses pengeringan maksimal terjadi pada rentang waktu tersebut. Kemudian pada menit ke-21 selisih *humidity ratio* relatif konstan, hal ini menunjukkan bahwa proses pengeringan yang terjadi tidak banyak karena kandungan *moisture content* pada batubara tersisa sedikit sehingga uap air yang berpindah ke udara juga sedikit.

#### **4.5 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi Beban Pengeringan 300 gram**

Dalam gambar 4.8 dibawah menunjukkan grafik perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi *drying time*. Didapatkan trend grafik yang menurun, hal ini menunjukkan bahwa uap air yang berpindah dari batubara akan berkurang seiring dengan berjalannya proses pengeringan sehingga mengakibatkan udara menyerap uap air akan berkurang juga seiring berjalannya proses pengeringan. Dengan beban pengeringan 300 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 9,9676 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 15,4841 gram.



**Gambar 4.8** Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi *drying time* pada variasi beban pengeringan 300 gram

Kemudian pada menit ke-31 nilai massa uap air yang dilepas batubara sebesar 0,3705 gram dan yang diterima oleh udara sebesar 0,1448 gram. Nilai massa uap air yang berpindah dihitung berdasarkan *moisture content* dari batubara, dengan menggunakan persamaan

**$H_2O$  Batubara =  $m$  batubara  $\times$  *moisture content***, guna mengetahui jumlah uap air total yang terkandung dalam batubara dimana saat kondisi *moisture content* dari batubara tinggi maka jumlah uap air yang ada dalam batubara juga tinggi. Jumlah untuk massa uap air yang diserap oleh udara dapat dihitung dengan selisih Humidity Ratio  $\Delta\omega = \omega_{out} - \omega_{inlet}$ , lalu persamaan  **$m$  udara =  $m$   $\times$  *interval pengeringan***, sedangkan untuk jumlah massa uap air yang dilepas batubara pada menit ke-1 adalah hasil pengurangan nilai  $H_2O$  dalam batubara pada menit ke-0 dengan  $H_2O$  menit ke-1

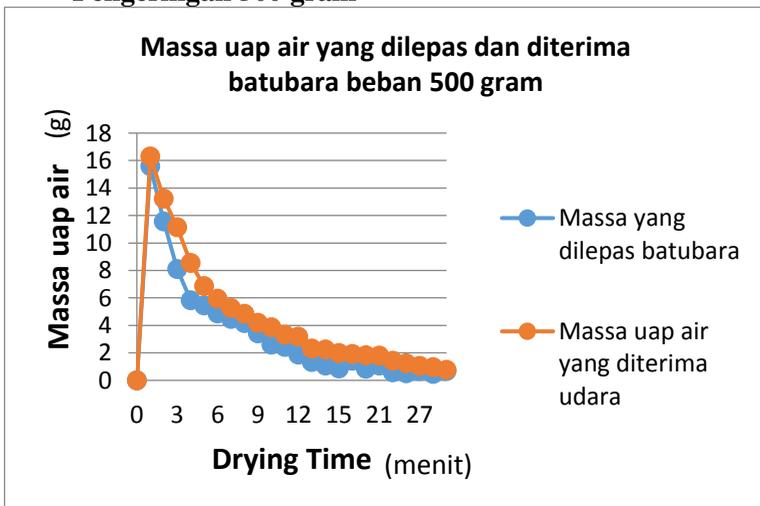
$$(massa\ uap\ air)_{ke-1} = (H_2O\ pada\ Batubara)_{ke-0} - (H_2O\ pada\ Batubara)_{ke-1},$$

digunakan untuk mendapatkan massa uap yang diserap udara  **$massa\ uap\ air\ diterima\ udara = m\ udara \times \Delta\omega$**  .

didalam teorinya untuk massa uap air yang dilepas batubara dan yang diserap oleh udara besarnya sama.

Dari hasil percobaan trend grafik didapatkan mengalami penurunan secara signifikan sampai dengan menit ke-8 lalu cenderung konstan hingga menit ke-31, trend grafik menurun secara signifikan menunjukkan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara cukup banyak pada menit ke-1 sampai dengan menit ke-8. Secara teori besarnya massa uap air yang dilepas dari batubara menuju udara seharusnya sama, tetapi dalam percobaan yang telah dilakukan terjadi perbedaan. Hal ini dikarenakan *human error* saat pengambilan dan pengamatan data, serta alat ukur yang kurang akurat.

#### 4.6 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi Beban Pengeringan 500 gram



**Gambar 4.9** Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi *drying time* pada variasi beban pengeringan 500 gram

Pada gambar 4.9 menunjukkan grafik perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi *drying time*. Trend grafik yang didapatkan menurun dimana hal ini menunjukkan uap air yang dilepas oleh batubara akan berkurang seiring dengan berjalannya proses pengeringan, sehingga mengakibatkan udara menyerap uap air akan berkurang juga seiring berjalannya waktu. Dengan beban pengeringan 500 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 15,5911 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 16,2885 gram. Kemudian pada menit ke-31 nilai massa uap air yang dilepas batubara sebesar 0,6747 gram dan yang diterima oleh udara sebesar 0,7621 gram. Nilai massa uap air yang berpindah dihitung berdasarkan *moisture content* dari batubara, dengan menggunakan persamaan

**$H_2O$  Batubara = m batubara x moisture content**, guna mengetahui jumlah uap air total yang terkandung dalam batubara dimana saat kondisi *moisture content* dari batubara tinggi maka jumlah uap air yang ada dalam batubara juga tinggi. Jumlah untuk massa uap air yang diserap oleh udara dapat dihitung dengan selisih Humidity Ratio  $\Delta\omega = \omega_{out} - \omega_{inlet}$ , lalu persamaan  **$m udara = m \times interval pengeringan$** , sedangkan untuk jumlah massa uap air yang dilepas batubara pada menit ke-1 adalah hasil pengurangan nilai  $H_2O$  dalam batubara pada menit ke-0 dengan  $H_2O$  menit ke-1

$$(massa\ uap\ air)_{ke-1} = (H_2O\ pada\ Batubara)_{ke-0} -$$

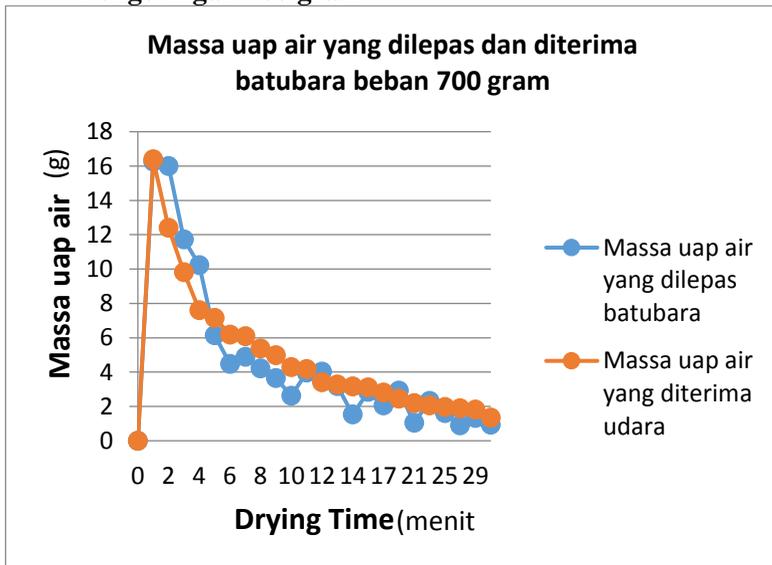
$(H_2O\ pada\ Batubara)_{ke-1}$ , digunakan untuk mendapatkan massa uap yang diserap udara

**$massa\ uap\ air\ diterima\ udara = m\ udara \times \Delta\omega$**  .  
didalam teorinya untuk massa uap air yang dilepas batubara dan yang diserap oleh udara besarnya sama.

Dari hasil percobaan trend grafik didapatkan mengalami penurunan secara signifikan sampai dengan menit ke-7 lalu cenderung konstan hingga menit ke-31, trend grafik menurun secara signifikan menunjukkan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara cukup banyak pada menit

ke-1 sampai dengan menit ke-7. Secara teori besarnya massa uap air yang dilepas dari batubara menuju udara seharusnya sama, tetapi dalam percobaan yang telah dilakukan terjadi perbedaan. Hal ini dikarenakan *human error* saat pengambilan dan pengamatan data, serta alat ukur yang kurang akurat.

#### 4.7 Analisa Perbandingan Massa Uap Air yang Berpindah dari Batubara menuju Udara pada Variasi Beban Pengeringan 700 gram



**Gambar 4.10** Perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi *drying time* pada variasi beban pengeringan 700 gram

Dalam gambar 4.10 diatas menunjukkan grafik perbandingan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara fungsi *drying time*. Didapatkan trend grafik yang menurun, hal ini menunjukkan bahwa uap air yang berpindah dari batubara akan berkurang seiring dengan berjalannya proses pengeringan sehingga mengakibatkan udara menyerap uap air akan berkurang

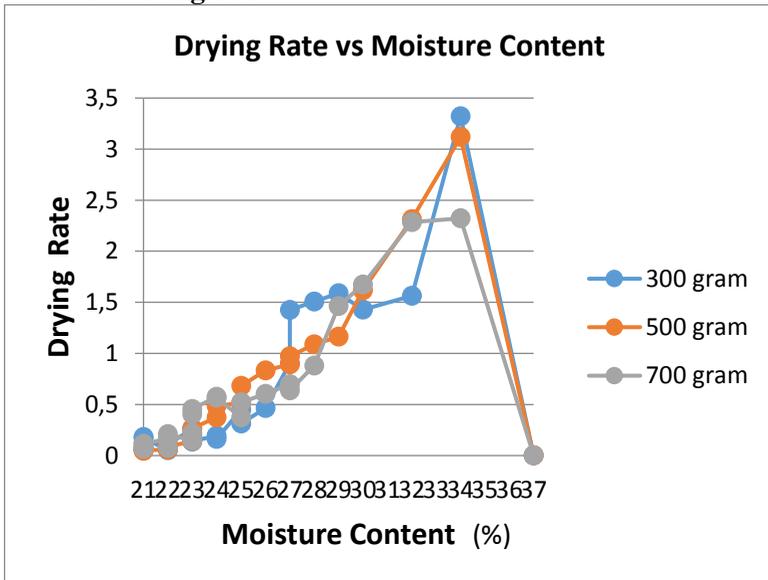
juga seiring berjalannya proses pengeringan. Dengan beban pengeringan 700 gram pada menit ke-1, didapatkan nilai dari massa uap air yang dilepas batubara sebesar 16,2581 gram dan yang diserap oleh udara sebesar 16,3879 gram. Kemudian pada menit ke-31 nilai massa uap air yang dilepas batubara sebesar 0,9404 gram dan yang diterima oleh udara sebesar 1,3426 gram. Nilai massa uap air yang berpindah dihitung berdasarkan *moisture content* dari batubara, dengan menggunakan persamaan  **$H_2O \text{ Batubara} = m \text{ batubara} \times \text{moisture content}$** , guna mengetahui jumlah uap air total yang terkandung dalam batubara dimana saat kondisi *moisture content* dari batubara tinggi maka jumlah uap air yang ada dalam batubara juga tinggi. Jumlah untuk massa uap air yang diserap oleh udara dapat dihitung dengan selisih Humidity Ratio  $\Delta\omega = \omega_{out} - \omega_{inlet}$ , lalu persamaan  **$m \text{ udara} = m \times \text{interval pengeringan}$** , sedangkan untuk jumlah massa uap air yang dilepas batubara pada mneit ke-1 adalah hasil pengurangan nilai  $H_2O$  dalam batubara pada menit ke-0 dengan  $H_2O$  menit ke-1

**$(\text{massa uap air})_{ke-1} = (H_2O \text{ pada Batubara})_{ke-0} - (H_2O \text{ pada Batubara})_{ke-1}$** , digunakan untuk mendapatkan massa uap yang diserap udara

**$\text{massa uap air diterima udara} = m \text{ udara} \times \Delta\omega$**  .  
didalam teorinya untuk massa uap air yang dilepas batubara dan yang diserap oleh udara besarnya sama.

Dari hasil percobaan trend grafik didapatkan mengalami penurunan secara signifikan sampai dengan menit ke-7 lalu cenderung konstan hingga menit ke-31, trend grafik menurun secara signifikan menunjukkan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara cukup banyak pada menit ke-1 sampai dengan menit ke-7. Secara teori besarnya massa uap air yang dilepas dari batubara menuju udara seharusnya sama, tetapi dalam percobaan yang telah dilakukan terjadi perbedaan. Hal ini dikarenakan *human error* saat pengambilan dan pengamatan data, serta alat ukur yang kurang akurat.

#### 4.8 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap *Drying Rate* Fungsi *Moisture Content*



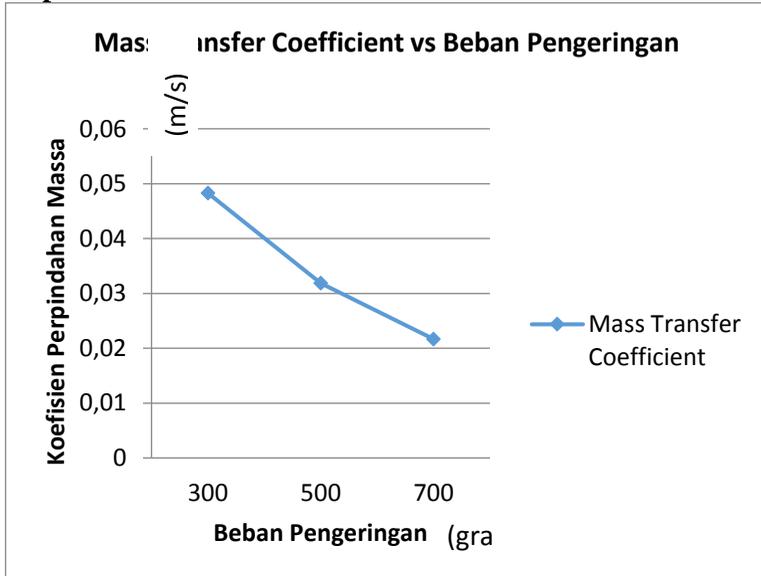
**Gambar 4.11** Pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi *moisture content*

Dalam gambar 4.11 diatas dapat dilihat grafik pengaruh beban pengeringan terhadap *drying rate* fungsi *moisture content*, grafik ini adalah perbandingan antara *perubahan moisture content* dengan *drying rate* dalam suatu kondisi tertentu. Pada grafik diatas dengan variasi beban pengeringan 300 gram, 500 gram, dan 700 gram yang menandakan memiliki pengaruh terhadap *drying rate* fungsi *moisture content*. Variasi yang memiliki *drying rate* paling besar sebesar 3,3225 % per menit yaitu beban pengeringan 300 gram, kemudian diikuti beban pengeringan 500 gram yang mempunyai nilai *drying rate* sebesar 3,1182 % per menit dan beban pengeringan 700 gram yang mempunyai *drying rate* sebesar 2,3225 % per menit. Ketika nilai *moisture content* berada diatas 30 % maka memiliki nilai *drying rate* paling besar, lalu

*drying rate* akan berkurang seiring dengan berkurangnya *moisture content*. Disaat nilai dari *moisture content* menurun hingga 22 % maka setelahnya nilai *drying rate* mempunyai kecenderungan konstan, hal ini disebabkan kandungan *moisture content* dalam batubara sudah berkurang sampai batas maksimalnya.

Pada grafik diatas terjadi perbedaan *drying rate* dan *moisture content* akibat pengaruh beban pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada permukaan batubara. Daya serap menurun maka laju pengeringan akan menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah beban yang lebih kecil. Lalu pengaruh dari hubungan antara variasi beban dengan nilai koefisien perpindahan massa, dimana semakin banyak jumlah beban pengeringan maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan massanya. Koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi laju perpindahan massa  $n''_A = h_m \cdot A \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$ . Ketika laju perpindahan massa besar maka nilai *drying rate* juga akan semakin besar. Pada saat nilai *moisture content* tinggi maka nilai *drying rate* juga akan tinggi, dan begitu juga sebaliknya saat *moisture content* rendah maka nilai *drying rate* juga akan rendah. Dalam percobaan yang telah dilakukan diperoleh massa batubara basah dan kering setelah proses di oven, dimana digunakan untuk mendapatkan nilai *drying rate* dan *moisture content* guna mengetahui massa uap air yang dilepas batubara dan diserap oleh udara yang terjadi untuk tiap satuan waktu.

#### 4.9 Analisa Pengaruh Beban Pengeringan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa



**Gambar 4.12** Pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan massa

Perpindahan massa adalah proses perpindahan massa uap air dari batubara menuju udara pengering, dalam gambar 4.12 dapat dilihat grafik pengaruh beban pengeringan terhadap koefisien perpindahan massa dengan variasi beban pengeringan 300 gram, 500 gram, dan 700 gram. Dari grafik didapatkan trend menurun seiring dengan bertambahnya beban pengeringan, pada saat beban pengeringan 300 gram nilai dari koefisien perpindahan massa sebesar 0,04828 m/s, beban pengeringan 500 gram mempunyai nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,03186 m/s dan beban pengeringan 700 gram mempunyai nilai koefisien perpindahan massa sebesar 0,02167 m/s.

Dari grafik ditunjukkan trend yaitu semakin bertambahnya beban pengeringan maka nilai koefisien perpindahan massa akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi yang terjadi pada udara pengering, dimana semakin banyaknya jumlah batubara yang dikeringkan maka luasan permukaan pengeringan akan bertambah. Dengan semakin luasnya permukaan, hal ini mengakibatkan kandungan air yang dilepaskan dari permukaan batubara menjadi lebih banyak. Semakin banyaknya uap air pada udara pengering, menyebabkan udara pengering semakin cepat jenuh sehingga mengurangi daya serap air pada permukaan batubara. Daya serap menurun maka laju pengeringan akan menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah beban yang lebih kecil. Lalu pengaruh dari hubungan antara variasi beban dengan nilai koefisien perpindahan massa, dimana semakin banyak jumlah beban pengeringan maka semakin kecil nilai koefisien perpindahan massanya

$hm = \frac{nA}{A \cdot n \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})}$ , Koefisien perpindahan massa akan mempengaruhi laju perpindahan massa  $n''_A = h_m \cdot A \cdot n \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$ , dimana semakin besar nilai koefisien perpindahan massa maka semakin besar juga nilai dari laju perpindahan massanya. Pada gambar 4.12 diketahui untuk beban pengeringan 300 gram mempunyai nilai koefisien perpindahan massa paling besar.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dalam eksperimen *cyclone coal dryer* dan dengan analisa yang telah dilakukan untuk mendapatkan hasil pengujian yang ditampilkan berupa grafik-grafik hasil eksperimen, dapat disimpulkan bahwa :

1. Dari variasi beban pengeringan yang telah ditentukan, beban pengeringan 300 gram dapat mengurangi *moisture content* dari batubara awal sebesar 36,154 % menjadi 20,323 %. Beban pengeringan 500 gram dapat mengurangi *moisture content* dari batubara awal sebesar 36,655 % menjadi 20,712 %. Beban pengeringan 700 gram dapat mengurangi *moisture content* dari batubara awal sebesar 37,023 % menjadi 21,471 %..
2. Dari variasi beban pengeringan yang telah ditentukan, beban pengeringan 300 gram memiliki nilai *drying rate* sebesar 3,3225 % per menit. Beban pengeringan 500 gram memiliki nilai *drying rate* sebesar 3,1182 % per menit. Beban pengeringan 700 gram memiliki nilai *drying rate* sebesar 2,3225 % per menit.
3. Dari variasi beban pengeringan yang telah ditentukan, beban pengeringan 700 gram memiliki nilai penurunan *relative humidity* paling tinggi yaitu dari awal 54,7 % pada menit ke-1 menuju 24,3 % pada menit ke-31. Penurunan *relative humidity* ini dikarenakan massa uap air yang berpindah dari batubara menuju udara semakin sedikit seiring dengan waktu pengeringan.
4. Dari variasi beban pengeringan yang telah ditentukan, beban pengeringan 700 gram memiliki selisih kenaikan

temperatur paling tinggi, yaitu dari temperature 33,4 °C pada menit ke-1 menuju temperatur 40,6 °C pada menit ke-31. Selisih paling tinggi ini dikarenakan untuk beban pengeringan 700 gram, kandungan *moisture content* pada batubara lebih banyak jika dibandingkan dengan beban pengeringan 500 gram dan 300 gram.

5. Dari variasi beban pengeringan yang telah ditentukan, untuk beban pengeringan 700 gram pada menit ke-1 memiliki penurunan nilai *humidity ratio* paling tinggi jika dibandingkan dengan beban pengeringan 500 gram dan 300 gram.
6. Dari ketiga variasi yang telah ditentukan, koefisien perpindahan massa paling besar terjadi pada beban pengeringan 300 gram dengan nilai 0,04828 m/s. Beban pengeringan 500 gram memiliki nilai koefisien 0.03186 m/s. Beban pengeringan 700 gram memiliki nilai koefisien 0,02167 m/s.

## 5.2 Saran

Dalam eksperimen ini terdapat saran-saran yang dapat digunakan untuk mendapatkan hasil dengan kualitas yang meningkat, sebagai studi eksperimen *cyclone coal dryer* antara lain :

1. Perlu dilakukan studi numerik guna mendapatkan hasil yang dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen.
2. Perlu adanya pembaharuan alat ukur eksperimen guna meningkatkan keakuratan data hasil eksperimen
3. Melakukan pengecekan dan perawatan rutin pada alat eksperimen guna menjaga performa alat ekeperimen dan kualitas data yang dihasilkan memiliki keakuratan yang cukup baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kristofer Westbergh. 2007. *3D-Model of a Dryer Cyclone*. Höskolan i Borås Institutionen Ingenjörshögskolan, Borås.
- [2] Adi Krisnawan. 2013. *Studi Eksperimen Karakteristik Pengeringan Batubara Terhadap Variasi Beban Pengeringan Pada Cyclone Coal Dryer*. ITS Surabaya, Indonesia.
- [3] Edward K. Levy, Nenad Sarunac, Harun Bilirgen & Hugo Caram. 2006. “*Use Of Coal Drying To Reduce Water Consumed In Pulverized Coal Power Plants Final Report*”. Energy Research Center Lehigh University. Betlehem.
- [4] H. Osman, S.V. Jangam\*, J. D. Lease and Arun S. Mujumdar. 2011. *Drying of low-rank coal (LRC) – A review of recent patents and innovations*. Department of Mechanical Engineering National University, Singapore.
- [5] Moran MJ, Shapiro HN. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons Inc.; 2006.
- [6] Stoecker, Wilbert F. & Jones. 1982. *Refrigeration and Air Conditioning, 2<sup>nd</sup> Edition*. McGraw-Hill Inc. Urbana-Champaign.
- [7] Incropera Frank P & Dewitt David P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7<sup>th</sup> Edition*. John Wiley & Sons Inc : 2008.
- [8] Yilmazoglu, M. Zeki. ”rotary dryer. 2012. Energy Research Center Lehigh University. Betlehem.

- [9] Pita, Edward G., Jones, Jerold W. 1981. " *Air Concitioning Principles and Systems energy Approach*". John Wiley & Sons Inc. New York.
- [10] Hovmand, S. (1995). Fluidized Bed Drying. In Mujumdar, A.S. (Ed.) *Handbook of Industrial Drying* (pp.195-248). 2nd Ed. New York: Marcel Dekker.

## BIODATA PENULIS



Kukuh Ridho Dani Hermawan lahir di Ambon, 22 Maret 1993 merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari TK Kuncup Bunga Surabaya, menyelesaikan masa studi SD di Al-Azhar 11 Surabaya pada tahun 2005, dilanjutkan ke SMP Al-Hikmah Surabaya pada tahun 2008, dan SMA Negeri 1 Sidoarjo pada tahun 2011.

Lalu penulis melanjutkan studinya dengan menempuh jalur sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin pada tahun ajaran 2011/2012. Selama kuliah di Teknik Mesin ITS penulis aktif mengikuti organisasi Club Mesin ITS Autosport dimulai dari menjadi anggota divisi Public Relation sampai dengan menjadi ketua Club Mesin ITS Autosport. Di Teknik Mesin ITS penulis memilih bidang penjurusan pada Konversi Energi khususnya Laboratorium Termodinamika dan Perpindahan Panas dan mengerjakan tugas akhir dengan topik pengeringan batubara dibawah bimbingan Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng. Penulis menyelesaikan masa studi S1-nya pada tahun 2017. Untuk informasi dan masukan tentang penulisan ini bisa langsung diberikan pada email [kukuhhermawan150@gmail.com](mailto:kukuhhermawan150@gmail.com).

# LAMPIRAN

## Beban 300 gram

Beban	waktu	sudut	Yudara inlet	pudara	A	Q	n	Tin	Fb in	Tout	Fibout	w	berat	berat	Massa	massa	MC	m	H2O	H2O	w	Δw	Drying	Massa					
													basah	kering	tempat	sup air	%	g/m <sup>2</sup>	padat	butir	udara	udara	%	g/m <sup>2</sup>					
(Menit)	(°)	(m/s)	(kg/m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(%)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(g/kg)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g/m <sup>2</sup> )	(g)	(g)	(g/kg)	(g/kg)	(%)	(g/m <sup>2</sup> )					
300	0	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							43.6	20.3	11.37	3.42	2.48	0.82	0.36154	36.556	2.4717	162.6923	0	11.37	0	0	0		
300	1	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							34.9	50.1	17.77	4.12	3.03	0.8	0.32831	32.831	2.4717	147.741	14.5151	17.77	11.37	6.4062	332521	15.48415	
300	2	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							35.3	45.6	16.51	4.19	3.16	0.8	0.30383	30.383	2.4717	136.7257	11.0153	16.51	11.37	5.1383	244784	12.42005	
300	3	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							35.7	41.5	15.33	3.28	2.58	0.80	0.28226	28.226	2.4717	127.0161	9.70953	15.33	11.37	3.9600	2315674	9.57172	
300	4	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							36.0	38.2	14.32	3.07	2.48	0.85	0.26577	26.577	2.4717	119.5946	7.42153	14.32	11.37	2.9539	1.64923	7.139745	
300	5	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							36.4	36.5	13.98	3.44	2.79	0.88	0.25791	25.791	2.4717	114.2578	5.36078	13.98	11.37	2.6124	1.185952	6.31432	
300	6	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							36.7	35.5	13.82	4.02	3.26	0.96	0.24204	24.204	2.4717	108.8172	5.2862	13.82	11.37	2.4501	1.386883	6.529724	
300	7	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							36.9	34.5	13.57	3.39	2.8	0.95	0.23218	23.218	2.4717	104.5276	4.9864	13.57	11.37	2.2077	1.87545	5.328469	
300	8	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							37.3	33.7	13.55	3.46	2.88	0.96	0.22308	22.308	2.4717	100.3846	4.14294	13.55	11.37	2.1804	1.920654	5.270152	
300	9	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							37.5	33.1	13.45	3.99	3.32	0.88	0.21543	21.543	2.4717	96.94534	3.4928	13.45	11.37	2.0825	1.764284	5.03552	
300	10	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							37.8	32.2	13.3	3.5	2.96	0.88	0.20611	20.611	2.4717	92.74809	4.19725	13.3	11.37	1.9283	1.932721	4.666812	
300	11	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							38.1	31.4	13.18	4.16	3.5	0.88	0.20122	20.122	2.4717	90.54878	2.19931	13.18	11.37	1.8076	1.488736	3.460733	
300	12	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							38.4	30.4	12.96	3.79	3.23	0.91	0.19444	19.444	2.4717	87.5	3.04878	12.96	11.37	1.592	1.677507	3.847955	
300	13	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							38.6	29.2	12.58	3.9	3.32	0.86	0.19079	19.079	2.4717	85.85826	1.64474	12.58	11.37	1.2077	1.056497	2.91308	
300	14	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							38.8	28.6	12.45	3.18	2.74	0.84	0.18801	18.801	2.4717	84.61538	1.23898	12.45	11.37	1.0861	1.275529	2.616664	
300	15	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.0	28.1	12.36	3.09	2.69	0.93	0.18519	18.519	2.4717	83.33333	1.28205	12.36	11.37	0.9293	1.2386	2.400138	
300	17	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.3	27.3	12.2	3.25	2.82	0.89	0.1822	18.22	2.4717	84.91153	1.34811	12.2	11.37	0.8328	1.14909	2.012925	
300	19	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.5	26.7	12.06	4.28	3.67	0.9	0.18047	18.047	2.4717	83.21302	0.78851	12.06	11.37	0.6905	1.086501	1.668978	
300	21	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.7	26	11.86	3.66	3.17	0.92	0.17883	17.883	2.4717	83.47445	0.73857	11.86	11.37	0.497	0.82805	1.201277	
300	23	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.9	25.5	11.76	3.59	3.11	0.88	0.17712	17.712	2.4717	83.841	0.78048	0.76986	11.76	11.37	0.3913	0.885517	0.947003
300	25	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							40.0	25.2	11.68	3.34	2.91	0.9	0.17623	17.623	2.4717	83.90328	0.40152	11.68	11.37	0.3142	0.844613	0.759493	
300	27	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							40.1	24.9	11.6	4.36	3.75	0.89	0.17579	17.579	2.4717	83.91066	0.19665	11.6	11.37	0.2353	0.81035	0.568734	
300	29	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							40.2	24.6	11.52	3.57	3.1	0.89	0.17507	17.507	2.4717	83.91791	0.18872	11.52	11.37	0.1555	0.820969	0.375369	
300	31	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							40.2	24.4	11.43	3.97	3.43	0.89	0.17532	17.532	2.4717	83.941	0.87861	11.43	11.37	0.0599	0.802423	0.144782	

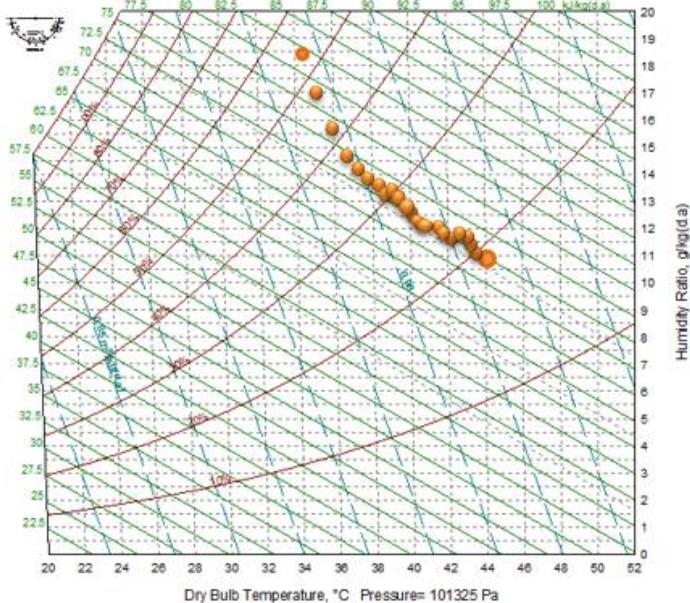
## Beban 500 gram

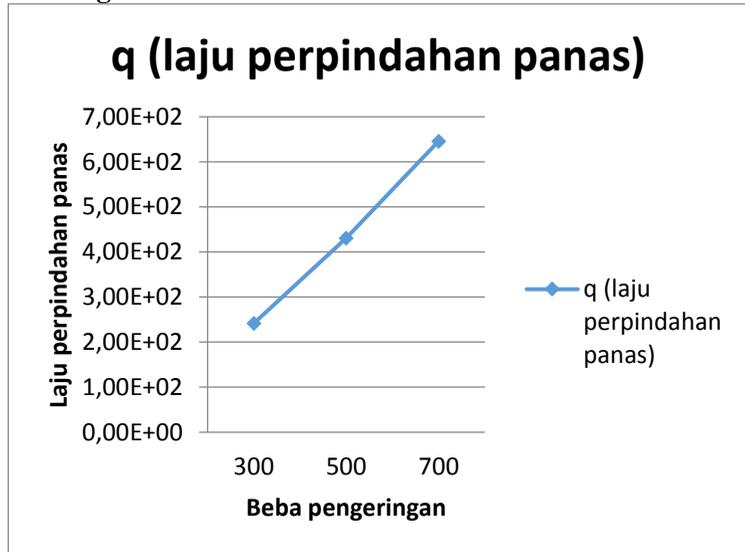
Beban	waktu	sudut	Yudara inlet	pudara	A	Q	n	Tin	Fb in	Tout	Fibout	w	berat	berat	Massa	massa	MC	m	H2O	H2O	w	Δw	Drying	Massa				
													basah	kering	tempat	sup air	%	g/m <sup>2</sup>	padat	butir	udara	udara	%	g/m <sup>2</sup>				
(Menit)	(°)	(m/s)	(kg/m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(%)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(g/kg)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g/m <sup>2</sup> )	(g)	(g)	(g/kg)	(g/kg)	(%)	(g/m <sup>2</sup> )				
500	0	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							43.5	20.20	11.25	3.69	2.66	0.88	0.36655	36.655	2.4717	183.274	0	11.25	11.25	0	0	0
500	1	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							34.2	52.70	17.99	4.17	3.07	0.89	0.33537	33.537	2.4717	167.825	15.5911	17.99	11.25	6.739	3.118219	16.28835
500	2	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							34.60	48.00	16.72	3.25	2.51	0.88	0.31224	31.224	2.4717	156.181	11.5648	16.72	11.25	5.4695	2.312957	13.22009
500	3	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							35.00	44.80	15.86	3.32	2.6	0.888	0.29605	29.605	2.4717	148.0263	9.0183	15.86	11.25	4.8119	1.618396	11.14723
500	4	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							35.50	40.50	14.78	4.21	3.26	0.87	0.28443	28.443	2.4717	142.2156	5.91075	14.78	11.25	3.5317	1.162749	9.536211
500	5	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							35.80	38.00	14.09	4.17	3.27	0.88	0.27366	27.366	2.4717	136.7781	6.42455	14.09	11.25	2.8547	1.087491	8.651682
500	6	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							36.20	36.20	13.71	3.96	3.15	0.89	0.26394	26.394	2.4717	131.9218	4.85629	13.71	11.25	2.4573	0.971258	5.99445
500	7	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							36.60	34.70	13.43	3.91	3.13	0.85	0.25449	25.449	2.4717	127.451	4.47084	13.43	11.25	2.1742	1.084169	5.255166
500	8	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							36.90	33.70	13.25	3.78	3.06	0.86	0.24658	24.658	2.4717	123.2877	4.16331	13.25	11.25	1.999	1.032662	4.831658
500	9	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							37.30	32.50	12.98	4.27	3.45	0.85	0.23977	23.977	2.4717	118.883	3.40463	12.98	11.25	1.7323	1.068926	4.187068
500	10	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							37.70	31.30	12.65	4.27	3.47	0.86	0.2346	23.46	2.4717	117.3021	3.58099	12.65	11.25	1.5943	0.516198	3.855514
500	11	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							38.10	30.10	12.62	3.83	3.15	0.87	0.22973	22.973	2.4717	114.8649	2.43719	12.62	11.25	1.3678	1.487438	3.856531
500	12	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							38.40	29.5	12.57	4.11	3.38	0.88	0.22601	22.601	2.4717	113.0031	1.86177	12.57	11.25	1.3173	0.372354	3.18399
500	13	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							38.70	28.20	12.2	3.85	3.18	0.85	0.22333	22.333	2.4717	111.6667	1.33643	12.2	11.25	0.9322	0.682786	2.301522
500	14	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.00	27.70	12.18	4.15	3.42	0.85	0.22121	22.121	2.4717	110.6061	1.06061	12.18	11.25	0.9303	0.212121	2.248588
500	15	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.20	27.30	12.07	4.18	3.46	0.9	0.21951	21.951	2.4717	109.7561	0.84996	12.07	11.25	0.8169	0.109999	1.974494
500	17	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.20	27.00	12.04	3.88	3.23	0.88	0.21667	21.667	2.4717	108.3333	1.42216	12.04	11.25	0.7024	0.142276	1.915276
500	19	20	1.122	0.082	0.03904	0.040284							39.70	26.30	11.7	3.91	3.25	0.84										

### Beban 700 gram

Beban	waktu	wujud	Udara inlet	udara	A	Q	m	Ta	Fh m	Tout	Fhout	w	berat basah	berat kering	Massa tempat	massa sap air	MC	m udara	H2O pada bahan	H2O dari bahan	w udara	w udara	hu	Drying rate	Massa sap air udara	uA disti udara (kg/m <sup>3</sup> mm)
(Menit)	(°)	(m/s)	(kg/m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(g/kg)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g/menit)	(%)	(g)	(g)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/menit)	(g/menit)	(g/s)	
700	0	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				43.20	20.2	11.07	9.5	2.53	0.88	0.37023	37.023	2.4717	259.1603	0	11.07	11.07	0	0	0	
700	1	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				33.40	54.7	17.85	4.08	2.98	0.91	0.347	34.7	2.4717	242.9022	16.2581	17.85	11.07	6.7801	2.232585	12.39805	0.20663
700	2	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				33.9	48.4	16.2	3.79	2.85	0.91	0.32414	32.414	2.4717	226.8966	16.0057	16.2	11.07	5.1294	2.226522	12.39805	0.20663
700	3	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				34.5	43.8	15.14	3.45	2.66	0.88	0.30739	30.739	2.4717	215.1571	11.7215	15.14	11.07	4.0618	1.674489	9.817603	0.16363
700	4	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				34.9	40.3	14.22	3.51	2.74	0.88	0.29278	29.278	2.4717	204.943	10.2321	14.22	11.07	3.1441	1.461337	7.59947	0.12666
700	5	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				35.4	38.7	14.03	4.18	3.24	0.87	0.28399	28.399	2.4717	198.7915	6.15142	14.03	11.07	2.9579	0.878775	7.149414	0.11916
700	6	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				35.9	36.6	13.63	4.08	3.2	0.91	0.2776	27.76	2.4717	194.3218	4.46977	13.63	11.07	2.5581	0.638539	6.183316	0.10306
700	7	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				36.4	35.5	13.59	3.9	3.08	0.87	0.27063	27.063	2.4717	189.4389	4.88282	13.59	11.07	2.5152	0.697546	6.079382	0.10132
700	8	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				36.8	34	13.5	3.75	2.98	0.84	0.2646	26.46	2.4717	185.2324	4.21558	13.5	11.07	2.2225	0.602225	5.37191	0.08953
700	9	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				37.3	32.7	13.14	3.54	2.85	0.88	0.2594	25.94	2.4717	181.5789	3.64442	13.14	11.07	2.064	0.520691	4.988808	0.08015
700	10	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				37.7	31.3	12.85	3.58	3.19	0.89	0.25566	25.566	2.4717	178.8644	2.61455	12.85	11.07	1.7717	0.375507	4.3832	0.07127
700	11	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				38.3	30.2	12.6	3.31	2.7	0.87	0.25	25	2.4717	175	3.644	12.6	11.07	1.7284	0.566346	4.177641	0.06963
700	12	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				38.4	29.9	12.49	4.33	3.48	0.85	0.24425	24.425	2.4717	170.977	4.02399	12.49	11.07	1.4077	0.574713	3.402460	0.05671
700	13	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				39.1	28.1	12.43	3.52	3.28	0.85	0.2397	23.97	2.4717	167.7903	3.18676	12.43	11.07	1.355	0.45525	3.275113	0.05459
700	14	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				39.5	27.4	12.38	4.04	3.28	0.84	0.2375	23.75	2.4717	166.25	1.54026	12.38	11.07	1.307	0.220087	3.159694	0.05265
700	15	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				39.6	27.2	12.36	3.75	3.08	0.88	0.23345	23.345	2.4717	163.4146	2.83537	12.36	11.07	1.2821	0.405052	3.098909	0.05165
700	17	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				39.7	26.8	12.24	3.79	3.11	0.84	0.23051	23.051	4.8341	161.3559	2.0587	12.24	11.07	1.1633	0.14705	2.811763	0.04886
700	19	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				39.9	26.2	12.09	3.29	2.74	0.86	0.22564	22.564	4.8341	158.4362	2.91972	12.09	11.07	1.015	0.028551	2.453313	0.04089
700	21	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				40.1	25.7	11.98	3.85	3.18	0.87	0.22183	22.183	4.8341	157.3826	1.05966	11.98	11.07	0.9094	0.072662	2.198072	0.03663
700	23	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				40.3	25.3	11.92	4.02	3.32	0.86	0.22152	22.152	4.8341	155.0633	2.31926	11.92	11.07	0.848	0.148561	2.040665	0.03416
700	25	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				40.4	25.1	11.89	4.18	3.45	0.85	0.21922	21.922	4.8341	153.4535	1.60984	11.89	11.07	0.8161	0.114988	1.972802	0.03288
700	27	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				40.5	24.9	11.86	3.99	3.31	0.87	0.21795	21.795	4.8341	152.9641	0.89935	11.86	11.07	0.7897	0.063525	1.894248	0.03157
700	29	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				40.6	24.7	11.82	4.08	3.38	0.84	0.21605	21.605	4.8341	151.2346	1.37953	11.82	11.07	0.7505	0.094967	1.814001	0.03023
700	31	20	1.122	0.0082	0.035904	0.040284				40.6	24.3	11.63	4.24	3.51	0.84	0.21471	21.471	4.8341	150.3941	0.94045	11.63	11.07	0.5555	0.087175	1.342763	0.02238

### Grafik psikometrik titik 1 & 2 berdasarkan waktu pengeringan



**Hubungan mass & heat transfer**

## Rancangan Penelitian

