



TUGAS AKHIR - TM184835

SIMULASI PENGARUH BENTUK *PERFORATED PLATE* DENGAN VARIASI KECEPATAN UDARA PENDINGIN PADA PERFORMA *COAL DRYER* DENGAN TIPE *FLUIDIZED BED*

Teofilus Evan Rusel
NRP. 02111640000143

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TM184835

SIMULASI PENGARUH BENTUK *PERFORATED PLATE* DENGAN VARIASI KECEPATAN UDARA PENDINGIN PADA PERFORMA *COAL DRYER* DENGAN TIPE *FLUIDIZED BED*

Teofilus Evan Rusel
NRP. 02111640000143

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TM184835

**SIMULATION FOR EFFECT OF PERFORATED
PLATE FORM WITH DRYING AIR VELOCITY
VARIATION ON COAL DRYER PERFORMANCE
WITH FLUIDIZED BED TYPE**

Teofilus Evan Rusel
NRP. 02111640000143

Advisor
Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.
NIP. 196505051990031005

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)

HALAMAN PENGESAHAN

SIMULASI PENGARUH BENTUK *PERFORATED PLATE* DENGAN VARIASI KECEPATAN UDARA PENERING PADA PERFORMA *COAL DRYER* DENGAN TIPE *FLUIDIZED BED*

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Tenfilus Evan Rusel
NRP. 02111640000143

Disetujui oleh:

1. **Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.** (Pembimbing)
NIP. 196505051990031005
2. **Ary Bachtar K.P., S.T., M.T., Ph.D** (Penguji 1)
NIP. 197105241997021001
3. **Is Bunvamin Suryo, S.T., M.Sc.** (Penguji 2)
NIP. 198208192012121003
4. **Bambang Arip D., S.T., Ph.D** (Penguji 3)
NIP. 197804012002121001

SURABAYA
AGUSTUS 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULASI PENGARUH BENTUK *PERFORATED PLATE* DENGAN VARIASI KECEPATAN UDARA PENERING PADA PERFORMA *COAL DRYER* DENGAN TIPE *FLUIDIZED BED*

Nama Mahasiswa : Teofilus Evan Rusel
NRP : 02111640000143
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

ABSTRAK

Batubara merupakan bahan bakar fosil yang menjadi sumber energi pembangkitan listrik terbesar di Indonesia. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), pada tahun 2018, PLTU Batubara dari berbagai kepemilikan menempati urutan pertama jenis pembangkitan listrik dengan daya bangkitan terbesar di Indonesia dengan total energi bangkitan sebesar 26.410,7 MW atau sebesar 46,74% dari total energi bangkitan seluruh jenis pembangkit di Indonesia. Pada saat ini, terdapat beberapa PLTU Batubara yang memiliki boiler yang didesain untuk menggunakan jenis batubara high rank dalam pengoperasiannya, salah satunya adalah PLTU Ombilin. Sementara itu, berdasarkan buku Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (PERSERO) Tahun 2019-2028, total cadangan batubara Indonesia didominasi oleh batubara berjenis low rank. Perubahan penggunaan jenis batubara pada boiler PLTU akan berdampak terhadap diaktifkannya pulverizer redundant. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode untuk meningkatkan kualitas batubara. Salah satu metode yang dapat dilakukan adalah proses pengeringan yang dapat menurunkan moisture content batubara, sehingga terjadi kenaikan nilai LHV pada batubara. Dengan melakukan metode pengeringan batubara, diharapkan dapat meningkatkan reliability dan availability dari PLTU Batubara.

Penelitian dilakukan dengan menggunakan aplikasi Aspen Plus v10 untuk mensimulasikan fluidized bed dryer sebagai pengering batubara dengan media pengering berupa udara. Selain itu juga dilakukan perhitungan teoritis sebagai pembanding. Terdapat 2 jenis perforated plate yang dibandingkan, yaitu Type A dengan 80 orifice berukuran 10mm dan Type B dengan 325 orifice berukuran 5mm. Kecepatan udara pengeringan pada masukan dryer divariasikan pada 10 m/s, 11 m/s, 12 m/s, 13 m/s dan 14 m/s. Simulasi dilakukan bertahap per menit dengan 15 menit pengeringan setiap variasinya. Beban pengeringan pada tiap variasi sebesar 300 gram dengan ukuran partikel terdistribusi rata dari 3 mm s/d 5 mm.

Data yang didapatkan pada penelitian ini adalah moisture content, drying rate, temperatur, serta LHV batubara secara simulasi dan perhitungan teoritis, serta temperatur dan humidity ratio secara simulasi. Penentuan variasi terbaik dilakukan berdasarkan peningkatan LHV batubara tertinggi. Berdasarkan simulasi dan perhitungan teoritis yang telah dilakukan, diketahui bahwa LHV tertinggi dicapai oleh kecepatan udara pengering 14 m/s dengan nilai hasil simulasi sebesar 4125,1 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-A dan 4126,3 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-B, serta hasil perhitungan teoritis sebesar 4127,8 kkal/kg. Dari penelitian juga diketahui bahwa perbedaan Perforated Plate Type-A dan Type-B tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa fluidized bed dryer, walaupun Perforated Plate Type-B memiliki performa yang sedikit lebih baik daripada Type-A pada simulasi dikarenakan persebaran lubang orifice yang lebih merata.

Kata kunci : Batubara, Fluidized Bed Dryer, Perforated Plate Bed, moisture content, LHV

SIMULATION FOR EFFECT OF PERFORATED PLATE FORM WITH DRYING AIR VELOCITY VARIATION ON COAL DRYER PERFORMANCE WITH FLUIDIZED BED TYPE

Student Name : Teofilus Evan Rusel
Student's ID : 0211164000143
Department : Mechanical Engineering
Advisory Lecturer : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

ABSTRACT

Coal is a fossil fuel which is the largest source of energy for electricity generation in Indonesia. Based on data from the Ministry of Energy and Mineral Resources (ESDM), in 2018, coal-fired power plants from various ownership ranks first in the type of electricity generation with the largest generation power in Indonesia with a total generation energy of 26,410.7 MW or 46.74% of the total energy generation of all types of power plants in Indonesia. At this time, there are several coal-fired power plants that have boilers designed to use high rank coal types in their operations, one of which is the Ombilin Power Plant. Meanwhile, based on the book Rancangan Umum Pengembangan Tenaga Listrik PT. PLN (PERSERO) In 2019-2028, Indonesia's total coal reserves are dominated by low rank coal. Changes in the use of coal types in the PLTU boiler will have an impact on activating the redundant pulverizer. Therefore, we need a method to improve coal quality. One method that can be done is the drying process which can reduce the moisture content of coal, resulting in an increase of the LHV value in coal. By implementing the coal drying method, it is expected to increase the reliability and availability of coal fired power plants.

The research was conducted using the Aspen Plus v10 application to simulate a fluidized bed dryer as a coal dryer with a drying medium in the form of air. In addition, theoretical

calculations are also carried out as a comparison. There are 2 types of perforated plates being compared, namely Type A with 80 10mm orifices and Type B with 325 5mm orifices. The drying air velocity at the dryer input was varied at 10 m / s, 11 m / s, 12 m / s, 13 m / s and 14 m / s. The simulation is carried out in stages per minute with 15 minutes of drying for each variation. The drying load for each variation is 300 grams with the particle size evenly distributed from 3 mm to 5 mm.

The data obtained in this study are moisture content, drying rate, temperature, and coal LHV by simulation and theoretical calculations, as well as temperature and humidity ratio by simulation only. Determination of the best variation is carried out based on the highest increase in LHV coal. Based on the simulation and theoretical calculations that have been done, it is known that the highest LHV is achieved by the drying air velocity of 14 m / s with a simulation result value of 4125.1 kcal / kg for Perforated Plate Type-A and 4126.3 kcal / kg for Perforated Plate Type. -B, as well as the theoretical calculation results of 4127.8 kcal / kg. From the research it is also known that the differences in Perforated Plate Type-A and Type-B do not have a significant effect on the performance of the fluidized bed dryer, even though Perforated Plate Type-B has a slightly better performance than Type-A in the simulation due to the more equally-distributed orifice holes.

Keywords : Coal, Fluidized Bed Dryer, Perforated Plate Bed, moisture content, LHV

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya sampaikan kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa atas limpahan rahmat, kasih dan karunia sehingga laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orangtua serta keluarga yang selalu memberikan semangat dan do'a yang tak henti-henti hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng., selaku dosen pembimbing serta mentor yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan nasehat kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Ary Bachtiar K.P., S.T., M.T., Ph.D, Bapak Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., serta Bapak Bambang Arip D., S.T., Ph.D yang telah bersedia menjadi dosen penguji pada Seminar Proposal serta Sidang Tugas Akhir penulis, serta memberikan masukan, saran serta kritik dalam penulisan penelitian ini.
4. Seluruh Dosen beserta staff karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS - ITS yang telah memberikan bekal berupa ilmu pengetahuan serta sarana dan prasarana selama perkuliahan.
5. AspenTech yang telah menyediakan aplikasi Aspen Plus v10 yang digunakan oleh penulis untuk melaksanakan simulasi.
6. Rekan BPH HMM 2018/2019, PSDM HMM 2018/2019 (Eja, Echa, Izzan, Faris, Farhan Allen, Joseph, Fitri, Andira), serta OC Acara POROS 2017 (Burhan, Naufal, Dika, Adima, Firra) yang telah memberikan banyak pelajaran hidup dan pengalaman berharga pada penulis.
7. Miftihatul Jannah yang selalu menemani dan menjadi penyemangat penulis selama penulisan tugas akhir.
8. Rekan – rekan penghuni terakhir kos kurnia yang selalu menemani penulis dalam masa pandemi Covid-19.

9. Rekan – rekan Paduan Suara Kerubim, Suweger serta Nakamse yang telah menjadi tempat istirahat serta bercerita selama penulisan.
10. Seluruh rekan saya di ITS khususnya rekan Departemen Teknik Mesin utamanya angkatan M59.

Semoga amal dan jasa yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat imbalan dari Allah SWT.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan terimakasih.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
2.1 Batubara	7
2.2 Mekanisme Pengeringan	9
2.3 Fluidized Bed Coal Dryer.....	10
2.4 Prinsip Perpindahan Panas Batubara secara Transient	14
2.5 Prinsip Perpindahan Massa	22
2.5.1 Drying Rate	22
2.5.2 <i>Moisture Content</i>	26
2.6 Prinsip LHV dan HHV Batubara.....	26
2.7 Prinsip <i>Psychrometric Chart</i> pada Udara Pengering.....	28
2.7.1 Dry Bulb Temperature.....	29
2.7.2 <i>Wet Bulb Temperature</i>	29
2.7.3 <i>Dew Point Temperature</i>	29
2.7.4 <i>Relative Humidity</i> (ϕ)	30
2.7.5 <i>Humidity Ratio</i> (ω)	31
2.7.6 Proses yang terjadi pada udara pengering <i>Fluidized Bed Dryer</i>	33

2.8	Aspen Plus	35
2.9	Penelitian Terdahulu	43
2.9.1	Penelitian Simanjuntak 2018	44
2.9.2	Penelitian Edward K. Levy 2006	47
2.9.3	Penelitian N. H. Tri 2018	50
BAB 3 Metodologi PenelitiAN		53
3.1	Metode Penelitian	53
3.2	Simulasi Aspen Plus	54
3.3	<i>Flowchart</i> Penelitian	61
3.3.1	<i>Flowchart</i> Metode Penelitian	61
3.3.2	<i>Flowchart</i> Simulasi dengan Aspen Plus	62
3.3.3	<i>Flowchart</i> Perhitungan Perpindahan Panas secara <i>Transient</i>	64
3.3.4	<i>Flowchart</i> Perhitungan Perpindahan Massa	66
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		69
4.1	Data Hasil Simulasi dan Perhitungan	69
4.2	Analisis dan Contoh Perhitungan	69
4.2.1	Perhitungan Kecepatan Alir Udara Pengeri- ng pada Bed	69
4.2.2	Perhitungan Perpindahan Panas secara <i>Transient</i> pada Batubara	74
4.2.3	Perhitungan Perpindahan Massa pada Batubara	77
4.3	Validasi Hasil Simulasi dan Perhitungan	80
4.4	Analisis Performa Fluidized Bed Dryer Hasil Simulasi dan Perhitungan Teoritis	86
4.4.1	Analisis Grafik Moisture Content sebagai Fungsi Waktu Pengeringan	86
4.4.2	Analisis Drying Rate Batubara Fungsi Waktu 93	
4.4.3	Analisis Temperatur Batubara Fungsi Waktu 98	

4.4.4 Analisis Grafik LHV sebagai Fungsi Waktu Pengerinan.....	104
4.5 Analisis Udara Pengerin dari Hasil Simulasi ...	112
4.5.1 Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pendingin terhadap Temperatur Keluar Udara Pengerin Hasil Simulasi	112
4.5.2 Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pendingin terhadap <i>Humidity Ratio</i> Udara Pengerin Hasil Simulasi.....	114
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	119
5.1 Kesimpulan.....	119
5.2 Saran	120
DAFTAR PUSTAKA	121
LAMPIRAN.....	123
BIODATA PENULIS	157

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Fluidized Bed Dryer</i>	11
Gambar 2. 2 Jenis-jenis perforated plate	11
Gambar 2. 3 Proses fluidisasi pada perforated-plate fluidized bed dryer	12
Gambar 2. 4 Grafik nilai Cd fungsi Re	13
Gambar 2. 5 Ilustrasi perpindahan panas batubara.....	14
Gambar 2. 6 Grafik laju pengeringan.....	24
Gambar 2. 7 Properti <i>Psychrometric Chart</i>	28
Gambar 2. 8 Ilustrasi proses pemanasan dan humidifikasi	33
Gambar 2. 9 Proses Pemanasan dan Humidifikasi pada <i>Psychrometric Chart</i>	33
Gambar 2. 10 Pemilihan <i>component</i> pada <i>properties</i> simulasi Aspen Plus.....	37
Gambar 2. 11 Ilustrasi <i>process flowsheet</i> dari <i>fluidbed</i> pada Aspen Plus.....	39
Gambar 2. 12 Ilustrasi 3 tipe plate pada <i>fluidbed</i>	41
Gambar 2. 13 Profil <i>bed</i> dari pengering penelitian Simanjuntak	44
Gambar 2. 14 Grafik persentase moisture content berdasarkan fungsi waktu dengan sudut blade (a) 10°, (b) 20°, (c) 30° penelitian Simanjuntak.....	45
Gambar 2. 15 Grafik drying rate berdasarkan fungsi waktu dengan sudut blade (a) 10°, (b) 20°, (c) 30° penelitian Simanjuntak.....	46
Gambar 2. 16 Skema alat eksperimen penelitian Edward K. Levy 2006.....	48
Gambar 2. 17 Grafik pengaruh kecepatan udara pengering terhadap drying rate penelitian Edward K. Levy 2006.....	49
Gambar 2. 18 Grafik pengaruh temperatur udara pengering terhadap drying rate penelitian Edward K. Levy 2006.....	49
Gambar 2. 19 Moisture Content vs Drying Time kecepatan pengeringan 11m/s dan 13m/s pada 2 tipe perforated plate penelitian N. T. Hutomo 2018.....	51

Gambar 2. 20 Drying Rate vs Drying Time tipe perforated 5mm dan 10mm pada 3 jenis kecepatan pengeringan penelitian Widarwis 2018.....	52
Gambar 3. 1 Pemilihan fluida kerja.....	54
Gambar 3. 2 Pemilihan model <i>equation of state</i>	55
Gambar 3. 3 Permodelan sistem dengan <i>fluidized bed</i> pada Aspen Plus	55
Gambar 3. 4 Tingkat keadaan <i>stream</i> AIR-IN.....	56
Gambar 3. 5 Tingkat keadaan <i>stream</i> COAL-IN.....	56
Gambar 3. 6 Atribut batubara	56
Gambar 3. 7 <i>Particle size distribution</i> batubara	57
Gambar 3. 8 Tingkat keadaan <i>specification fluidized bed dryer</i>	57
Gambar 3. 9 Tingkat keadaan <i>geometry fluidized bed dryer</i>	58
Gambar 3. 10 tingkat keadaan <i>gas distributor fluidized bed dryer</i>	58
Gambar 3. 11 Flowchart metode penelitian.....	61
Gambar 3. 12 <i>Flowchart</i> simulasi dengan Aspen Plus.....	63
Gambar 3. 13 <i>Flowchart</i> perhitungan perpindahan panas secara <i>transient</i>	65
Gambar 3. 14 <i>Flowchart</i> perhitungan perpindahan massa	67
Gambar 4. 1 Dimensi perforated plate (a) Type-A, (b) Type-B ..	70
Gambar 4. 2 Perbandingan <i>moisture content</i> batubara dengan eksperimen Nugroho.....	81
Gambar 4. 3 Perbandingan temperatur keluar udara pengering dengan eksperimen Nugroho	84
Gambar 4. 4 Grafik simulasi <i>moisture content</i> batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering	86
Gambar 4. 5 Grafik simulasi <i>moisture content</i> batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering	86
Gambar 4. 6 Grafik perhitungan teoritis <i>moisture content</i> batubara dengan variasi kecepatan udara pengering	87

Gambar 4. 7 Grafik simulasi <i>moisture content</i> batubara dengan variasi tipe <i>perforated plate</i> pada kecepatan 10m/s dan 14m/s	90
Gambar 4. 8 Grafik perhitungan teoritis <i>moisture content</i> batubara dengan variasi tipe <i>perforated plate</i> pada kecepatan 10m/s dan 14m/s	90
Gambar 4. 9 Grafik simulasi <i>drying rate</i> batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering....	93
Gambar 4. 10 Grafik simulasi <i>drying rate</i> batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering	93
Gambar 4. 11 Grafik perhitungan teoritis <i>drying rate</i> batubara dengan variasi kecepatan udara pengering	94
Gambar 4. 12 Grafik simulasi <i>drying rate</i> batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe <i>perforated plate</i>	96
Gambar 4. 13 Grafik perhitungan teoritis <i>drying rate</i> batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe <i>perforated plate</i>	96
Gambar 4. 14 Grafik simulasi temperatur batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering	98
Gambar 4. 15 Grafik simulasi temperatur batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering	99
Gambar 4. 16 Grafik perhitungan teoritis temperatur batubara dengan variasi kecepatan udara pengering	99
Gambar 4. 17 Grafik simulasi temperatur batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe <i>perforated plate</i>	102
Gambar 4. 18 Grafik simulasi temperatur batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe <i>perforated plate</i>	102

Gambar 4. 19 Grafik simulasi LHV batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering ..	104
Gambar 4. 20 Grafik simulasi LHV batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering ..	105
Gambar 4. 21 Grafik perhitungan teoritis LHV batubara dengan variasi kecepatan udara pengering.....	105
Gambar 4. 22 Grafik simulasi LHV batubara dengan variasi tipe <i>perforated plate</i> pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s	108
Gambar 4. 23 Grafik perhitungan teoritis LHV batubara dengan variasi tipe <i>perforated plate</i> pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s.....	109
Gambar 4. 24 Grafik simulasi temperatur keluar udara pengering pada <i>Perforated Plate Type-A</i> dengan variasi kecepatan udara pengering	112
Gambar 4. 25 Grafik simulasi temperatur keluar udara pengering pada <i>Perforated Plate Type-B</i> dengan variasi kecepatan udara pengering	112
Gambar 4. 26 Grafik simulasi <i>humidity ratio</i> keluar udara pengering pada <i>Perforated Plate Type-A</i> dengan variasi kecepatan udara pengering	114
Gambar 4. 27 Grafik simulasi <i>humidity ratio</i> keluar udara pengering pada <i>Perforated Plate Type-B</i> dengan variasi kecepatan udara pengering	114
Gambar 4. 28 Psychrometric chart plot udara keluar Perforated Plate Type-A pada kecepatan udara masuk 10m/s, 12m/s, dan 14m/s.....	116
Gambar 4. 29 Psychrometric chart plot udara keluar Perforated Plate Type-A pada kecepatan udara masuk 10m/s, 12m/s, dan 14m/s.....	117

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Kapasitas terpasang pembangkit di Indonesia	1
Tabel 1. 2 Data cadangan batubara Indonesia (Juta Ton)	2
Tabel 2. 1 Komposisi dan parameter fisik batubara.....	7
Tabel 2. 2 Proximate Analysis batubara PLTU Ombilin	8
Tabel 2. 3 Ultimate Analysis batubara PLTU Ombilin.....	8
Tabel 2. 4 Sulfuric Analysis batubara PLTU Ombilin.....	9
Tabel 2. 5 Pengaruh temperatur terhadap konduktivitas termal batubara.....	17
Tabel 2. 6 Pengaruh temperatur terhadap <i>thermal diffusivity</i> batubara tipe brown coal	19
Tabel 2. 7 Pengaruh Biot Number terhadap koefisien C1 dan ζ_1	21
Tabel 2. 8 Pilihan NC Solid Property Model Aspen Plus..	37
Tabel 2. 9 Parameter dari <i>fluidbed</i> pada <i>Aspen Plus</i>	40
Tabel 3. 1 Parameter tetap pada simulasi	59
Tabel 3. 2 <i>Proximate analysis</i> batubara	59
Tabel 3. 3 <i>Ultimate analysis</i> batubara	59
Tabel 3. 4 <i>Sulfuric analysis</i> batubara	60
Tabel 3. 5 Variasi pada simulasi	60
Tabel 4. 1 Spesifikasi dan variabel eksperimen Nugroho Hutomo Tri.....	81
Tabel 4. 2 Perhitungan <i>error</i> pada moisture content batubara per menit pengeringan.....	82
Tabel 4. 3 Perhitungan error pada temperatur keluar udara pemanas setiap menit pengeringan	85

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Negara Indonesia merupakan negara dengan populasi penduduk terbesar ke-4 di dunia setelah China, India dan Amerika Serikat berdasarkan data dari *World Health Organisation* (WHO). Dengan populasi penduduk yang tinggi, Indonesia akan memiliki kebutuhan energi listrik yang tinggi pula. Ketersediaan energi listrik dapat dipenuhi dengan adanya pembangkit listrik. Tabel 1.1 menunjukkan kontribusi berbagai jenis pembangkit listrik dalam memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia.

Tabel 1. 1 Kapasitas terpasang pembangkit di Indonesia

Tipe	2017			2018		
	MW Sendir	Sewa	Excess Power/IPP/ Kapasitas cadang Pembangkit UGPL lain	MW Sendir	Sewa	Excess Power/IPP/ Kapasitas cadang Pembangkit UGPL lain
PLTA/PLTM	3.583,18	0,12	1.376,88	3.583,48	-	1.358,16
PLTA Pumped Storage	-	-	-	-	-	-
PLTP	350,89	-	1.045,80	379,50	-	1.234,80
PLTBareut	0,50	-	149,49	0,50	-	167,04
PLTsa	-	-	-	-	-	-
PLTg	7,90	1,35	11,06	11,88	0,75	12,56
PLTStorasi	-	-	-	-	-	-
PLT BBT Lain	0,30	-	0,00	0,47	-	78,60
PLTU	3.875,83	559,63	795,13	3.598,33	642,42	687,13
PLTGU	9.822,81	80,08	931,80	9.838,11	80,00	933,80
PLTAR	36,32	46,58	21,00	-	-	-
PLTD	3.849,71	2.173,64	578,50	4.275,30	1.878,97	503,40
Grand Total	17.770,50	45,08	2.871,30	17.818,00	90,22	8.348,10
PLU (Batasak, Gsa)	1.260,59	7,50	41,30	1.225,00	-	41,30
Angkat	-	-	-	-	-	-
Subtotal	39.451,80	3.004,24	12.259,94	40.446,50	2.672,14	12.350,78
TOTAL			10.726,97			30.509,52

* Pembangkit proyek tidak dimasukkan

Sumber: (PT. PLN (PERSERO), 2019)

Berdasarkan data pada table 1.1, penyedia energi listrik tertinggi untuk Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara dengan kapasitas pembangkitan 17.770,50 MW. Banyak faktor yang dapat mempengaruhi kapasitas pembangkitan oleh sebuah PLTU Batubara, antara lain kualitas batubara (*coal rank*), peletakan burner pada boiler, kemampuan perpindahan panas dalam desain *heat exchanger*, serta kondisi operasional pembangkit. Penggunaan batubara dengan kualitas yang tidak

memenuhi spesifikasi dapat mengakibatkan penurunan *availability* serta *reliability* PLTU Batubara.

Pada PLTU Batubara, sebelum dialirkan oleh coal pipe menuju Boiler, batubara akan digerus dan dihancurkan dengan mesin penggerus (pulverizer) secara kontinu. Pada umumnya, akan dipasang 1 standby pulverizer sebagai cadangan apabila ada pulverizer yang mengalami kerusakan. PLTU Ombilin merupakan contoh pembangkit yang memiliki 4 pulverizer dimana salah satunya berperan sebagai standby pulverizer. Terdapat 2 unit pembangkitan PLTU Ombilin dengan kapasitas 2x100 MW.

PLTU Batubara di Indonesia pada umumnya di desain untuk menggunakan batubara tipe high rank yang memiliki kalori tinggi/sangat tinggi. PLTU Ombilin juga demikian. Pada desain awal unit pembangkitan PLTU Ombilin, digunakan batubara (Guarantee Coal) dengan LHV sebesar 6598 kcal/kg.

Tabel 1. 2 Data cadangan batubara Indonesia (Juta Ton)

Kualitas	Cadangan (Juta Ton)		
	Terkira	Terbukti	Total
Kalori Rendah	7108.27	7121.47	14220.74
Kalori Sedang	3570.7	6841.66	10412.36
Kalori Tinggi	541.6	2769.2	3310.8
Kalori Sangat Tinggi	264.19	240.21	504.39
JUMLAH	11484.76	16972.53	28457.29

Sumber: (PT. PLN (PERSERO), 2019)

Tabel 1.2 menunjukkan data cadangan batubara di Indonesia pada Rancangan Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN Persero Tahun 2019-2029. Cadangan batubara diklasifikasikan dalam 4 jenis kualitas berdasarkan PP No. 45 Tahun 2003, yaitu Kalori Rendah, Kalori Sedang, Kalori Tinggi dan Kalori Sangat Tinggi. Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa cadangan batubara yang dimiliki oleh Indonesia didominasi oleh batubara dengan kalori rendah.^[11]

Masalah akan timbul apabila PLTU Batubara yang didesain untuk menggunakan batubara kualitas tinggi / kalori tinggi tersebut terpaksa menggunakan batubara dengan kualitas dibawah desain yaitu kualitas rendah / kalori rendah. Karena kalorinya yang lebih rendah, untuk menghasilkan daya bangkitan yang sama, maka dibutuhkan massa alir batubara yang lebih tinggi. Oleh karena itu, beberapa PLTU Batubara terpaksa mengaktifkan pulverizer redundant. Hal ini berakibat terhadap turunnya reliability dan availability pembangkit. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah proses pengeringan batubara dengan harapan akan menurunkan moisture content pada batubara sehingga dapat meningkatkan nilai LHV batubara. Dengan peningkatan nilai LHV batubara, maka PLTU Batubara tidak lagi perlu untuk menjalankan polverizer redundant sehingga reliability dan availability pembangkit dapat naik.

Salah satu penelitian tentang pengeringan batubara adalah yang telah dilakukan oleh Great River Energy (USA) dimana pada penelitian tersebut, moisture content pada batubara dikurangi dengan diupkan melalui kontak langsung batubara dengan udara panas didalam sebuah alat yang dinamakan fluidized bed dryer. Udara panas tersebut didapatkan dari waste heat flue gas, waste heat dari kondensor, dll. Dengan penggunaan alat tersebut, PLTU Coal Creek USA yang memiliki kapasitas 550 MW mengalami kenaikan efisiensi boiler sebesar 3%, penurunan gas buang SO₂ dan CO₂ sebesar 3.3%, serta mengalami penurunan penggunaan make-up water pada cooling tower sebesar 2×10^5 galon/hari.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan rumusan masalah sebagai berikut, yaitu:

- A. Bagaimana pengaruh jenis *perforated plate bed* terhadap performa *perforated plate fluidized bed coal dryer* pada kecepatan dibawah fluidisasi secara simulasi?
- B. Bagaimana pengaruh kecepatan udara pengering terhadap performa *perforated plate fluidized bed coal dryer* secara simulasi?

- C. Bagaimana proses perpindahan panas dan massa pada batubara selama pengeringan?
- D. Bagaimana proses pengeringan ditinjau dari sisi udara pengering dengan psychrometric chart?

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada perumusan masalah di atas, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- A. Mengetahui pengaruh jenis *perforated plate bed* terhadap performa *perforated plate fluidized bed coal dryer* pada kecepatan dibawah fluidisasi secara simulasi.
- B. Mengetahui pengaruh kecepatan udara pengering terhadap performa *perforated plate fluidized bed coal dryer* secara simulasi.
- C. Mengetahui proses perpindahan panas dan massa pada batubara selama pengeringan.
- D. Mengetahui proses pengeringan ditinjau dari sisi udara pengering dengan psychrometric chart.

1.4 Batasan Masalah

Batasan yang digunakan di dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- A. Simulasi dilakukan pada aplikasi AspenPLUS v10 dengan permodelan *Fluidized Bed*.
- B. Beban pengeringan batubara untuk tiap variasi sama yaitu sebesar 300 gram.
- C. Diameter batubara terdistribusi rata berukuran 3 mm s/d 5 mm dan berbentuk bola
- D. Simulasi dilakukan secara steady state dengan pengamatan penurunan *moisture content*, *flow rate*, dan temperatur batubara, serta *flowrate* dan temperatur udara pengering setiap 1 menit selama 15 menit.pengeringan.
- E. *Proximate*, *ultimate* dan *sulfuric analysis* dari seluruh partikel batubara sebelum pengeringan adalah sama.

F. Kedua tipe *perforated plate* dianggap memiliki discharge coefficient yang sama, yaitu 0,8.

1.5 Manfaat Penelitian

Tugas akhir ini memiliki manfaat antara lain:

- A. Memberikan pengetahuan tentang teknologi fluidized bed dryer sebagai salah satu metode pengeringan batubara yang dapat menaikkan nilai LHV batubara dengan metode simulasi.
- B. Mengetahui tipe perforated plate yang lebih optimal dalam penggunaannya terhadap fluidized bed coal dryer.
- C. Sebagai data referensi atau acuan untuk pengembangan fluidized bed coal dryer dengan tipe perforated plate yang dapat dipergunakan untuk perkembangan dan penelitian selanjutnya.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKSA

2.1 Batubara

Batubara merupakan salah satu jenis sumber energi tak terbarukan yang terbentuk dari endapan organik terutama tumbuhan. Batubara terbentuk dengan perubahan secara kimiawi yang terjadi dalam suhu dan tekanan yang tinggi, serta waktu yang lama. Batubara memiliki kandungan karbon yang tinggi, oleh karena itu bersifat mudah terbakar sehingga dapat menjadi salah satu bahan bakar dalam dunia pembangkitan listrik di dunia. Saat ini, batubara merupakan sumber energi pembangkitan listrik yang memiliki kontribusi terbesar dalam penyediaan energi listrik di Indonesia. Secara kandungan kimiawi, batubara dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Komposisi dan parameter fisik batubara

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

Sumber: (Speight, 2005)

Terdapat berbagai parameter fisik yang membedakan jenis batubara. Pada umumnya, Analisis parameter fisik tersebut dikategorikan menjadi 3 golongan, yaitu Proximate Analysis, Ultimate Analysis dan Sulfuric Analysis. Proximate Analysis terdiri dari Moisture Content, Volatile Matter, Fixed Carbon dan Ash Content. Ultimate Analysis terdiri dari Ash, Carbon, Hydrogen, Nitrogen, Chlorine, Sulfur dan Oxygen. Sulfuric

Analysis terdiri dari Pyritic, Sulfate dan Organic. Pada Juli 2018, PT. PLN Sektor Pembangkitan dan Pengendalian Pembangkitan Ombilin melakukan Analisis tipe Proximate Analysis terhadap batubara yang dipergunakan oleh PLTU Ombilin. Hasil analisis ditunjukkan pada tabel 2.2.^[10]

Tabel 2. 2 Proximate Analysis batubara PLTU Ombilin

PROXIMATE ANALYSIS	
Moisture Content	40
Fixed Carbon	40.5
Volatile Matter	31.53
Ash Content	20.58

Sumber: (PT. PLN (PERSERO), 2018)

Di lain sisi, Harvoy E. Belkin, dkk juga pernah meneliti batubara yang dipergunakan oleh PLTU Ombilin dalam jurnalnya yang berjudul *Geochemistry of Selected Coal Samples from Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, and Papua, Indonesia*. Penelitian yang dilakukan mencakup Ultimate Analysis dan Sulfuric Analysis. Hasil Ultimate Analysis ditunjukkan pada tabel 2.3, sedangkan Sulfuric Analysis ditunjukkan pada tabel 2.4.^[5]

Tabel 2. 3 Ultimate Analysis batubara PLTU Ombilin

ULTIMATE ANALYSIS	
Ash	20.58
Carbon	73.16
Hydrogen	5.41
Nitrogen	1.35
Chlorine	0.033
Sulfur	0.51
Oxygen	9.14

Sumber: (Harvoy E. Belkin, 2007)

Tabel 2. 4 Sulfuric Analysis batubara PLTU Ombilin

SULFURIC ANALYSIS	
Pyritic	0.05
Sulfate	0.01
Organic	0.45

Sumber: (Harvoy E. Belkin, 2007)

Salah satu parameter utama dalam penelitian ini adalah moisture content. Moisture content merupakan persentase kandungan air yang terdapat di dalam batubara. Batubara dengan kualitas rendah (lignite) memiliki moisture content paling besar. *Moisture content* yang besar akan menghambat proses pembakaran batubara. Hal ini disebabkan karena proses penguapan kandungan air tersebut membutuhkan energi sehingga nilai kalor yang dihasilkan oleh proses pembakaran batubara akan menurun.

Moisture content dalam batubara menurut jenisnya dapat terbagi menjadi 4 kategori, yaitu:

1. *Surface moisture*
Merupakan kandungan air yang terdapat pada permukaan butiran batubara.
2. *Hydroscopic moisture*
Merupakan kandungan air yang terdapat pada rongga-rongga kapiler batubara.
3. *Decomposition moisture*
Merupakan kandungan air yang telah melalui proses dekomposisi dengan senyawa organik yang terdapat dalam batubara
4. *Mineral moisture*
Merupakan kandungan air berbentuk kristal yang terbentuk dari silika hidrat seperti tanah liat.

2.2 Mekanisme Pengeringan

Pengeringan adalah proses ekstraksi cairan yang terkandung dalam suatu material dengan media fluida (cair atau gas) yang

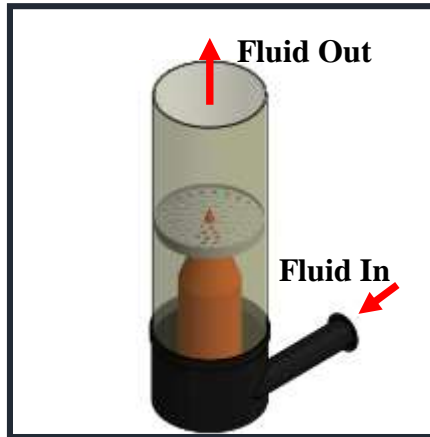
melakukan kontak dengan material tersebut. Proses pengeringan umumnya terdiri dari 2 jenis, yaitu:

1. Proses 1: Penguapan *moisture* yang terdapat pada permukaan material yang disebabkan oleh transfer panas dari udara pengering ke permukaan bahan.
2. Proses 2: Penguapan *moisture* yang terdapat di dalam material dengan terlebih dahulu mengalami proses difusi.

Proses pengeringan dipengaruhi oleh berbagai faktor. Faktor-faktor tersebut terbagi menjadi 2 golongan, yaitu dari sisi material yang dikeringkan, dan dari sisi fluida pengering. Faktor yang mempengaruhi proses pengeringan dari sisi material antara lain massa material/beban pengeringan, ukuran partikel material, *moisture content* awal dari material, dan temperatur awal material. Sedangkan dari sisi fluida pengering, faktor tersebut antara lain temperatur udara, kecepatan volumetrik aliran udara, dan kelembaban udara.^[12]

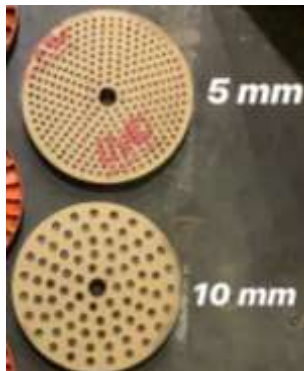
2.3 Fluidized Bed Coal Dryer

Fluidized bed dryer merupakan salah satu jenis peralatan yang umumnya digunakan secara luas di industry farmasi untuk mengurangi kadar air pada material berbentuk butiran/*granular*. *Fluidized bed dryer* bekerja dengan prinsip termodinamika, dimana fluida panas dialirkan melalui sisi bawah *drying chamber* dengan menggunakan *blower*. Sementara material berada pada bagian tengah *drying chamber*, tepatnya berada diatas *bed*. *Fluidized bed dryer* juga dapat digunakan untuk mengeringkan batubara sebelum masuk ke *pulverizer* dengan harapan dapat menurunkan *moisture content* dari batubara kualitas rendah/sedang.



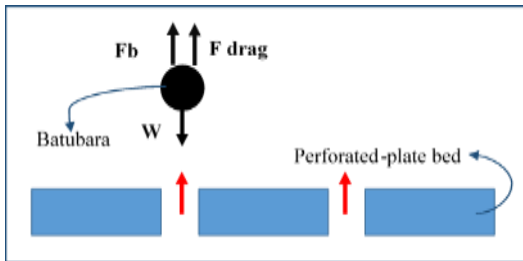
Gambar 2. 1 *Fluidized Bed Dryer*

Terdapat berbagai jenis *bed* yang memiliki pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik aliran fluida di atasnya. Salah satu jenis *bed* tersebut adalah *perforated-plate bed*. *Perforated-plate bed* merupakan bed yang terdiri dari lubang-lubang yang dinamakan *orifice*. Terdapat berbagai jenis *perforated-plate bed*, yang dibedakan berdasarkan ukuran *orifice* serta konfigurasi.



Gambar 2. 2 Jenis-jenis perforated plate

Di dalam *fluidized bed dryer*, terjadi proses fluidisasi. Fluidisasi (*fluidization*) merupakan proses rekayasa yang menyebabkan partikel-partikel padat memiliki kondisi menyerupai fluida (fluid-like state). Fluidisasi dapat terjadi dikarenakan adanya kontak antara partikel-partikel padat tersebut dengan fluida. Pada keadaan ini, partikel-partikel padat tersebut berada pada kondisi mengambang secara setimbang pada fluida. Kesetimbangan tersebut terjadi karena gaya gravitasi pada partikel-partikel padat sama dengan gaya dorong dan gaya drag yang disebabkan oleh aliran fluida. Fluidized bed dryer dikatakan telah mengalami proses fluidisasi apabila nilai drag force dari partikel ditambah dengan gaya angkat dari udara sama dengan gaya berat yang disebabkan oleh massa dari partikel. Kondisi kesetimbangan ini disebut sebagai kondisi minimum fluidisasi dan kecepatan fluida pengering pada saat ini disebut sebagai terminal velocity.



Gambar 2. 3 Proses fluidisasi pada perforated-plate fluidized bed dryer

Untuk memperoleh nilai terminal velocity, dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sum F_y = 0 \quad (2.1)$$

$$Fd + Fb - W = 0 \quad (2.2)$$

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

$$\frac{1}{2} C_d \rho_{udara} V^2 A = (\rho_{batubara} - \rho_{udara}) \forall g \quad (2.4)$$

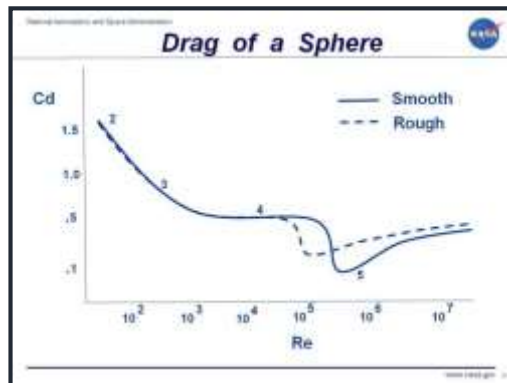
$$V = \sqrt{\frac{2(\rho_{batubara} - \rho_{udara}) \forall g}{C_d \rho_{udara} A}} \quad (2.5)$$

$$\forall = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (2.6)$$

dengan:

- F_d = Drag Force (kg m/s²)
- W = Berat batubara (kg m/s²)
- C_d = Koefisien drag batubara
- d = diameter batubara (m)
- V = Kecepatan fluidisasi minimum (m/s)
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)
- ρ = massa jenis (kg/m³)
- ∀ = Volume batubara (m³)
- A = Luasan penampang batu bara (m²)

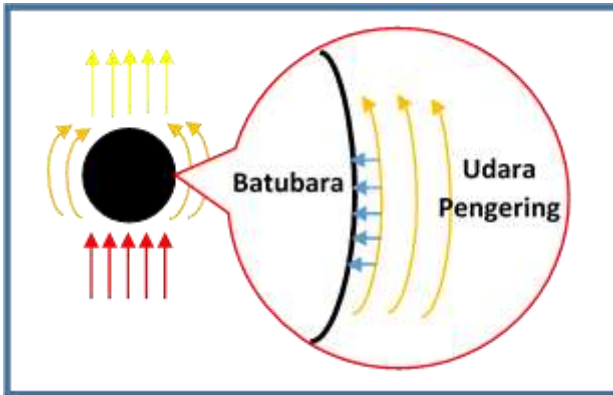
Dari persamaan (2.6), kita ketahui bahwa terminal velocity merupakan fungsi dari koefisien drag batubara (C_d). Nilai C_d merupakan fungsi dari Reynold Number. Oleh karena itu, nilai C_d dapat diketahui dari nilai Re. Gambar 2.4 merupakan grafik C_d berdasarkan fungsi Re untuk partikel berbentuk bola.^[9]



Gambar 2. 4 Grafik nilai C_d fungsi Re
Sumber: (NASA, Diakses Mei 2020)

2.4 Prinsip Perpindahan Panas Batubara secara Transient

Pada perforated plate fluidized bed coal dryer, batubara dengan temperatur awal berupa temperatur ruangan dilalui oleh udara panas. Fenomena ini mengakibatkan terjadinya perpindahan panas dari udara pengering ke batubara. Ilustrasi dari fenomena ini dapat terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Ilustrasi perpindahan panas batubara

Laju perpindahan panas dari fluida pengering ke material yang dikeringkan (dalam kasus ini batubara), ditentukan oleh koefisien konveksi perpindahan panas, luasan permukaan batubara, dan perbedaan temperatur yang ada antara batubara dan udara pengering. Hubungan tersebut dapat ditunjukkan oleh persamaan (2.9).

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

dengan:

- Q = laju perpindahan panas (W)
- h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)
- A = luas permukaan batubara (m²)
- T_{∞} = temperatur udara pengering (K)
- T_s = temperatur permukaan batubara (K)

Dari persamaan tersebut, diketahui bahwa ada 3 nilai yang harus diketahui, yaitu koefisien konveksi, luas permukaan batubara, temperatur udara pengering dan temperatur permukaan batubara.

Nilai koefisien konveksi dapat diketahui dengan pertamanya mengetahui nilai Reynolds Number dari udara. Nilai Reynolds Number dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (2.8)$$

dengan:

Re_D = Reynolds number

ρ = massa jenis udara pengering (kg/m^3)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

D = diameter batubara (m)

μ = viskositas absolut udara pengering (N.s/m^2)

Dari persamaan tersebut, diketahui bahwa nilai Reynolds Number berbanding lurus dengan nilai massa jenis udara pengering, kecepatan aliran fluida pengering, dan diameter batubara. Sebaliknya, nilai viskositas absolut pada udara pengering berbanding terbalik dengan nilai Reynolds Number.

Setelah mengetahui nilai Reynolds Number, selanjutnya kita perlu mencari nilai Nusselt Number. Nilai Nusselt Number untuk benda berbentuk bola dengan sifat aliran external flow dan aliran turbulent dapat diketahui dengan persamaan Whitaker^[4] yang dinyatakan sebagai berikut:

$$Nu_D = 2 + \left(0,4 \cdot Re_D^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re_D^{\frac{2}{3}}\right) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

dengan:

$$3,5 \leq Re \leq 7,6 \times 10^4$$

Pr = Prandtl number

Re = Reynolds number

μ = viskositas absolut udara pengering pada temperatur udara (m^2/s)

μ_s = viskositas absolut udara pengering pada temperatur *solid* (m^2/s)

Setelah mengetahui nilai Nusselt number, kita bisa mendapatkan nilai koefisien konveksi dari persamaan berikut:

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k_f} ; h = \frac{Nu \cdot k_f}{D} \quad (2.10)$$

dengan:

Nu = Nusselt number (*dimensionless*)

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)

D = diameter batubara (m)

k_f = koefisien konduksi perpindahan panas (W/m²K)

Sementara itu, kita dapat mengetahui nilai luas permukaan batubara dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = \frac{m}{\rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3} \times 4\pi r^2 \quad (2.11)$$

dengan:

m = massa batubara uji (kg)

ρ = massa jenis batubara uji (kg/m³)

r = jari-jari partikel batubara uji (m)

Kita mengetahui bahwa dalam proses pengeringan, temperatur permukaan batubara akan terus berubah seiring waktu pengeringan. Oleh karena itu, salah satu parameter laju perpindahan panas, yaitu solid temperature (T_s) akan menjadi tidak tetap. Hal ini biasanya disebut dengan perpindahan panas secara transient. Untuk mencari temperatur permukaan batubara per satuan waktu pengeringan, pertama-tama kita perlu mengetahui Biot Number. Biot Number merupakan parameter tanpa satuan yang dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$Bi = \frac{h Lc}{k} \quad (2.12)$$

Dengan:

Bi = Biot Number (*dimensionless*)

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m²K)

Lc = panjang karakteristik partikel batubara (m)

k = konduktivitas termal batubara (W/mK)

Konduktivitas termal batubara merupakan salah satu dari banyak parameter fisik batubara yang dapat diperoleh dengan melakukan penelitian. Penelitian untuk mengetahui konduktivitas termal batubara pernah dilakukan oleh Ada E. Ramazanova, dkk yang berjudul *Temperature Effect on the Thermal Conductivity of Black Coal* 2018. Pada penelitian tersebut, Ramazanova, dkk membuktikan bahwa konduktivitas termal batubara dapat berubah berdasarkan fungsi temperatur.^[1]

Tabel 2. 5 Pengaruh temperatur terhadap konduktivitas termal batubara

wet coal sample before thermal treatment		dry coal sample before thermal treatment		coal sample after thermal treatment (second run)	
T/K	$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	T/K	$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	T/K	$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$
298.15	0.340	298.2	0.321	298.2	0.269
299.02	0.339	299.4	0.320	299.7	0.269
322.13	0.379	300.0	0.314	300.0	0.270
340.02	0.419	325.8	0.351	320.0	0.275
352.10	0.457	342.6	0.367	330.4	0.279
371.07	0.491	359.0	0.380	342.2	0.285
372.01	0.491	377.8	0.390	355.7	0.289
390.03	0.502	377.0	0.391	374.0	0.292
410.08	0.488	383.3	0.390	404.0	0.297
422.21	0.471	399.4	0.385	436.4	0.309
435.15	0.445	437.4	0.357	466.1	0.317
450.04	0.412	463.0	0.333	466.2	0.316
462.06	0.392	473.5	0.328	480.2	0.322
480.14	0.381	486.1	0.333	496.1	0.326
495.15	0.380	-	-	-	-

^aStandard uncertainties, u , are $u(T) = 10$ mK and $u(\lambda) = 2.5\%$.

Sumber: (Ada E. Ramazanova, 2018)

Tabel 2.2 merupakan hasil penelitiannya berdasarkan 3 tipe batubara, yaitu batubara basah sebelum *thermal treatment*, batubara kering sebelum *thermal treatment*, dan batubara setelah *thermal treatment*. Tipe batubara dalam tabel 2.2 yang

dipergunakan sebagai acuan pada penelitian ini adalah batubara basah yang belum mengalami *thermal treatment*. Karena perbedaan temperatur menghasilkan konduktivitas termal yang berbeda, maka kita akan memanfaatkan data dengan range temperatur yang dapat dicapai oleh batubara simulasi (300K s/d 323K). Untuk mencari konduktivitas termal spesifik pada temperatur batubara tertentu, dapat digunakan metode interpolasi.

Dari persamaan diatas, kita dapat mengetahui bahwa Biot Number berbanding lurus dengan koefisien konveksi perpindahan massa dan panjang karakteristik batubara, dalam hal ini jari-jari batubara, sementara itu juga berbanding terbalik dengan konduktivitas termal batubara. Oleh karena itu, semakin besar nilai koefisien konveksi, semakin besar pula Biot Number. Besaran angka Biot Number dapat dipergunakan untuk mencari koefisien C_1 dan ζ_1 , dimana kedua koefisien tersebut berbanding lurus dengan besar Biot Number.

Parameter berikutnya yang diperlukan dalam pencarian perpindahan panas secara *transient* adalah *Fourier Number*. *Fourier Number* bisa didapatkan dari persamaan berikut:

$$Fo = \frac{\alpha t}{(Lc)^2} \quad (2.13)$$

Dengan:

- Fo = Fourier Number (*dimensionless*)
- α = thermal diffusivity partikel batubara (m^2/s)
- t = lama waktu pengeringan (jam)
- Lc = panjang karakteristik partikel batubara (m)

Dari persamaan Fourier Number, kita ketahui bahwa semakin besar thermal diffusivity partikel batubara dan lama waktu pengeringan, semakin besar pula Fourier Number. Sebaliknya, panjang karakteristik berbanding terbalik secara kuadrat pada besar Fourier Number.

Sama halnya dengan konduktivitas termal, *thermal diffusivity* juga merupakan salah satu dari banyak parameter fisik batubara yang dapat diperoleh dengan melakukan penelitian. Penelitian untuk mengetahui *thermal diffusivity* batubara pernah dilakukan oleh Monika Kosowska-Golachowska, dkk yang berjudul *Determination of the effective thermal conductivity of solid fuels by the laser flash method* 2014. Pada penelitian tersebut, Kosowska-Golachowska, dkk membuktikan bahwa *thermal diffusivity* batubara dapat berubah berdasarkan fungsi temperatur. [7]

Tabel 2. 6 Pengaruh temperatur terhadap *thermal diffusivity* batubara tipe brown coal

Temperature $T, ^\circ\text{C}$	Mass m, g	Bulk density $\rho, \text{g/cm}^3$	Thermal diffusivity $a, \text{mm}^2/\text{s}$	σ_a mm^2/s	Specific heat $c_p, \text{J/(gK)}$	σ_{sp} J/(gK)	Thermal conductivity $\lambda, \text{W/(mK)}$	σ_λ W/(mK)
0	1.286	0.91	0.113	0.008	1.347	0.004	0.088	0.009
300	1.200	0.88	0.113	0.002	1.345	0.006	0.134	0.003
500	1.115	0.84	0.315	0.013	1.501	0.035	0.309	0.027
700	0.898	0.81	1.065	0.003	1.706	0.021	0.837	0.004
900	0.820	0.77	1.065	0.008	1.777	0.026	1.373	0.013
1000	0.800	0.76	1.250	0.008	1.865	0.034	1.772	0.016

Sumber: (Monika Kosowska-Golachowska, 2014)

Tabel 2.2 merupakan tabel pengaruh temperatur terhadap nilai *thermal diffusivity* untuk batubara dengan tipe *brown coal*. Karena perbedaan temperatur menghasilkan *thermal diffusivity* batubara yang berbeda, maka kita akan memanfaatkan data dengan range temperatur yang dapat dicapai oleh batubara simulasi (300K s/d 323K). Untuk mencari konduktivitas termal spesifik pada temperatur batubara tertentu, dapat digunakan metode interpolasi.

Selanjutnya, kita dapat memperoleh temperatur batubara per satuan waktu pengeringan dengan menggunakan approximate solution yang didapatkan dengan persamaan berikut:

$$\theta_0^* = C1. \exp(-\zeta_1^2 \cdot Fo) \quad (2.14)$$

$$\theta^* = \theta_0^* \frac{1}{\zeta_1^2 \cdot r^*} \sin(\zeta_1^2 \cdot r^*) \quad (2.15)$$

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.16)$$

Dengan:

- θ_0^* = Perbandingan perbedaan temperatur *center* butiran batubara setelah dan sebelum satuan waktu pengeringan (*dimensionless*)
- $C1$ = koefisien fungsi Biot Number (*dimensionless*)
- ζ_1 = koefisien fungsi Biot Number (rad)
- Fo = *Fourier Number (dimensionless)*
- θ^* = Perbandingan perbedaan temperatur permukaan butiran batubara setelah dan sebelum satuan waktu pengeringan (*dimensionless*)

Seperti yang diketahui, besar koefisien $C1$ dan ζ_1 memiliki keterkaitan dengan Biot Number. F.P. Incropera, dkk telah menyatakan keterkaitan tersebut dalam bukunya yang berjudul *Fundamental of Heat and Mass Transfer 7th edition*. Keterkaitan tersebut dapat terlihat pada tabel 2.4.^[4]

Tabel 2. 7 Pengaruh Biot Number terhadap koefisien C_1 dan ζ_1

Bi^*	Plane Wall		Infinite Cylinder		Sphere	
	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060
0.03	0.1723	1.0049	0.2440	1.0075	0.2991	1.0090
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120
0.05	0.2218	1.0082	0.3143	1.0124	0.3854	1.0149
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179
0.07	0.2615	1.0114	0.3709	1.0173	0.4551	1.0209
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239
0.09	0.2956	1.0145	0.4195	1.0222	0.5150	1.0268
0.10	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298
0.15	0.3779	1.0237	0.5376	1.0365	0.6609	1.0445
0.20	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592
0.25	0.4801	1.0382	0.6856	1.0598	0.8447	1.0737
0.30	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0932	1.0528	1.1164
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713
0.7	0.7506	1.0919	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5994	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202
5.0	1.3138	1.2402	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	2.7654	1.8920
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249
20.0	1.4961	1.2699	2.2881	1.5919	2.9857	1.9781
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990
∞	1.5708	1.2733	2.4050	1.6018	3.1415	2.0000

^a $Bi = hL/k$ for the plane wall and hr_o/k for the infinite cylinder and sphere. See Figure 5.6.

Sumber: (F. P. Incropera, 2011)

Berdasarkan seluruh persamaan diatas, diketahui bahwa semakin besar kecepatan aliran fluida dan perbedaan temperatur antara batubara dan udara pengering, semakin besar pula koefisien konveksi. Selain itu, diketahui pula bahwa semakin besar koefisien konveksi dan jari-jari partikel batubara, maka semakin besar pula Biot Number. Selanjutnya, semakin besar nilai Biot Number, semakin besar pula koefisien C_1 dan ζ_1 . Di lain sisi, semakin besar lama waktu pengeringan, semakin besar pula nilai Fourier Number. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kecepatan aliran fluida, perbedaan temperatur antara batubara dan udara pengering, serta lama waktu pengeringan berbanding lurus dengan kenaikan temperatur batubara per satuan waktu.

2.5 Prinsip Perpindahan Massa

Pada saat dilakukan pengeringan oleh *Fluidized Bed Dryer* pada satuan waktu pengeringan, *Moisture content* yang terdapat pada permukaan partikel batubara akan berpindah ke udara pengering. Sementara itu, sebagian *moisture content* yang terdapat pada rongga-rongga kapiler partikel batubara juga akan mengalami proses difusi menuju ke permukaan batubara dan ikut terbawa oleh udara pengering. Dengan prinsip perpindahan massa, kita dapat menelusuri dan mengetahui lebih dalam tentang perpindahan massa yang terjadi antara batubara dengan udara pengering.

2.5.1 Drying Rate

Drying rate atau kecepatan pengeringan dapat didefinisikan sebagai laju perpindahan massa. Pada kasus perforated plated fluidized bed coal dryer, drying rate merupakan laju pengeringan batubara yang ditandai dengan perpindahan massa air dari batubara ke udara pengering yang melaluinya. Persamaan yang menyatakan besaran laju perpindahan massa tersebut adalah:

$$n_A = h_m \cdot (\rho_{A,S} - \rho_{A,m}) \quad (2.17)$$

dengan:

- n_A = laju perpindahan massa (kg s/m²)
 h_m = koefisien perpindahan massa (m/s)
 $\rho_{A,S}$ = massa jenis uap air jenuh pada permukaan batubara (kg/m³)
 $\rho_{A,\infty}$ = massa jenis uap air udara pengering (kg/m³)

Di lain sisi, laju perpindahan massa memiliki keterikatan dengan laju perpindahan panas. Keterikatan tersebut terdefinisi dalam persamaan berikut:

$$\frac{hL/k}{Pr^n} = \frac{h_m L / D_{AB}}{Sc^n} \quad (2.18)$$

$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} \cdot Le^{\frac{1}{3}}} \quad (2.19)$$

$$h_m = \frac{h \cdot D_{AB} \cdot Le^{\frac{1}{3}}}{k} \quad (2.20)$$

dengan:

- h = koefisien perpindahan panas (W/m²K)
 h_m = koefisien perpindahan massa (m/s)
 k = konduktivitas termal udara pengering (W/mK)
 D_{AB} = *Mass diffusivity* air pada udara (m²/s)
 Le = *Lewis number (non-dimensional)*

Sementara itu, nilai Lewis Number dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (2.21)$$

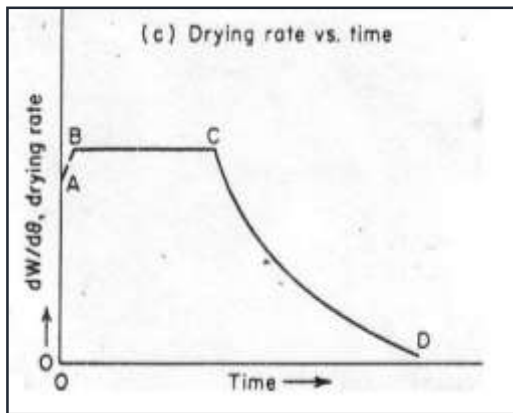
dengan:

- Le = *Lewis number (non-dimensional)*
 α = *thermal diffusivity* udara (W/m²K)
 D_{AB} = *Mass diffusivity* air pada udara (m²/s)

Dari persamaan diatas, dapat diketahui bahwa nilai koefisien konveksi perpindahan panas berbanding lurus dengan koefisien konveksi perpindahan massa dan perbedaan temperatur antara partikel batubara dan udara pengering. Oleh karena itu, dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin besar nilai koefisien konveksi perpindahan panas dan perbedaan temperatur antara partikel

batubara dan udara pengering, semakin tinggi pula nilai koefisien perpindahan massa. Semakin tinggi nilai koefisien perpindahan massa dan perbedaan temperatur antara partikel batubara dan udara pengering, semakin tinggi pula laju perpindahan massa.

Karena temperatur batubara dan koefisien perpindahan panas yang akan berubah-ubah berdasarkan fungsi waktu, maka nilai drying rate juga akan berubah-ubah berdasarkan fungsi waktu. Oleh karena itu, perubahan drying rate berdasarkan fungsi waktu dapat dipetakan berupa grafik. Berikut merupakan ilustrasi grafik laju pengeringan pada material terhadap fungsi waktu:



Gambar 2. 6 Grafik laju pengeringan

Pada umumnya, proses pengeringan terbagi menjadi 3 periode laju pengeringan terhadap fungsi waktu. Periode tersebut antara lain:

1. *First Drying Stage (A-B)*

Tahap ini ditunjukkan dengan huruf A menuju B pada gambar 2.6. Pada tahap ini drying rate mengalami kenaikan nilai. Hal ini dapat terjadi dikarenakan material yang dikeringkan menerima kalor sensibel dari udara. Proses ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat, sehingga, pada beberapa kasus, *first drying stage* hampir

tidak terlihat pada grafik perubahan drying rate terhadap waktu.

2. *Second Drying Stage (B-C)*

Tahap ini ditunjukkan dengan huruf B menuju C pada gambar 2.6. Pada tahap ini, drying rate memiliki nilai yang relative tetap terhadap perubahan waktu. Hal ini dapat terjadi dikarenakan total air yang lepas dari material yang dikeringkan masih berasal dari permukaan material tersebut. Pada tahap ini, kecepatan moisture yang berpindah dari rongga-rongga kapiler ke permukaan material akan sama dengan kecepatan moisture yang berpindah dari permukaan ke udara pengering. Proses ini berakhir pada saat moisture content pada material mencapai titik kritisnya (*critical moisture content*).

3. *Third Drying Stage (C-D)*

Tahap ini ditunjukkan dengan huruf C menuju D pada gambar 2.6. Titik C menunjukkan letak *critical moisture content*. Pada tahap ini, laju moisture yang keluar dari rongga-rongga kapiler ke permukaan material sudah tidak dapat mengimbangi laju moisture yang berpindah dari permukaan material ke udara pengering. Oleh karena itu, seluruh permukaan material akan terus mengering. Karena semakin menurunnya moisture di permukaan material, maka drying rate pun akan menurun.

Pada penerapannya, terdapat 2 golongan faktor yang mempengaruhi bentuk kurva drying rate berdasarkan fungsi waktu. 2 golongan tersebut adalah yang berhubungan dengan udara pengering dan yang berhubungan dengan sifat material yang dikeringkan. Faktor yang berhubungan dengan udara pengering, antara lain suhu, kecepatan volumetric, dan kelembaban udara pengering tergolong sebagai faktor primer. Sedangkan, faktor yang tergolong sekunder merupakan yang berhubungan dengan sifat material antara lain ukuran material, kadar air awal dan tekanan parsial material.^[12]

2.5.2 Moisture Content

Dengan diketahuinya *drying rate*, kita dapat mengetahui penurunan *moisture content* yang terjadi pada batubara. Penurunan *moisture content* dari batubara setelah pengeringan adalah salah satu bagian yang penting dalam penelitian ini. Hal ini dikarenakan penurunan *moisture content* merupakan parameter efektivitas dari sebuah *perforated plate fluidized bed dryer*. Dengan kata lain, *dryer* yang menghasilkan penurunan *moisture content* pada batubara tertinggi merupakan *dryer* yang lebih baik.

Penurunan *moisture content* dari batubara dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$\Delta\%MC = \frac{n_A \cdot t}{m_b} \times 100\% \quad (2.22)$$

dengan:

$\Delta\%MC$ = Perubahan *moisture content* (%)

n_A = laju perpindahan massa (kg s/ m²)

t = lama pengeringan (s)

m_b = massa batubara basah (kg)

2.6 Prinsip LHV dan HHV Batubara

Energi yang dihasilkan oleh batubara disebut sebagai nilai kalor batubara. Nilai kalor batubara dapat dibedakan menjadi 2, yaitu gross calorific value (GCV) atau juga disebut Higher Heating Value (HHV) dan net calorific value (NCV) atau juga disebut Lower Heating Value (LHV). HHV merupakan nilai panas laten penguapan air yang terdapat di dalam batubara ditambah dengan panas laten yang didapatkan dari pemanasan air selama proses pembakaran. Berbeda dengan HHV, nilai LHV didapatkan tanpa memperhitungkan panas laten untuk membentuk uap air karena dianggap nilai kalor karena pemanasan air tersebut ikut terbuang bersama dengan uap air.^[13]

Calorific value merupakan parameter kunci untuk menilai kualitas dari bahan bakar biomassa dalam aplikasinya di dunia energi. Karena pada beberapa kasus, pengukuran HHV sulit dilakukan, maka dibutuhkan sebuah persamaan yang dapat memprediksi nilai HHV pada biomassa. Beragam pengujian telah dilakukan untuk menemukan persamaan empiris yang dapat memprediksi nilai HHV dari suatu bahan bakar biomassa dari hasil proximate analysis.^[2] Berikut merupakan persamaan untuk memprediksi nilai HHV yang memiliki standar deviasi terkecil (1,469 MJ/kg) pada jurnal A Corellation for Calculating HHV from Proximate Analysis of Solid Fuels (2004):

$$HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078ASH \quad (2.23)$$

dengan:

HHV = Higher Heating Value (MJ/kg)

FC = Fixed carbon (%)

VM = Volatile matter (%)

ASH = Ash content (%)^[2]

Pada dasarnya, pengurangan moisture content pada batubara tidak akan menaikkan nilai HHV. Hal ini disebabkan karena nilai HHV diukur tanpa mempertimbangkan kalor yang diserap moisture untuk menguap pada batubara saat terjadi pembakaran. Oleh karena itu, proses pengeringan batubara akan menaikkan nilai yang memperhitungkan kalor penguapan *moisture*, yaitu LHV. Dalam perhitungannya, nilai LHV dapat diperoleh ketika kita telah memperoleh nilai HHV. Persamaan yang menunjukkan nilai LHV adalah:

$$LHV = HHV - \%MC \cdot m_b \cdot h_{fg} \quad (2.24)$$

dengan:

LHV = Lower Heating Value (MJ/kg)

HHV = Higher Heating Value (MJ/kg)

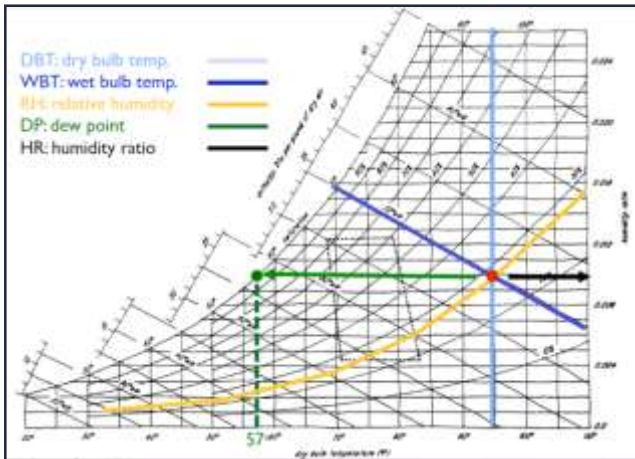
%MC = persentase *moisture content* (%)

m_b = massa batubara basah (kg)

h_{fg} = *heat of vaporization* (kJ/kg)

2.7 Prinsip *Psychrometric Chart* pada Udara Pengering

Analisis yang dapat dilakukan pada Perforated-Plate Fluidized Bed Coal Dryer tidak hanya pada sisi batubara sebagai material yang dikeringkan, melainkan juga pada udara pengering. Karakteristik udara pengering dapat diketahui melalui Analisis dengan menggunakan *psychrometric chart*. *Psychrometric chart* merupakan bidang ilmu yang mempelajari tentang karakter campuran antara udara dan uap air. Analisis *psychrometric chart* dapat dilakukan pada Perforated-Plate Fluidized Bed Coal Dryer dikarenakan udara pengering yang melewati batubara akan membawa moisture yang lepas dari batubara tersebut.



Gambar 2. 7 Properti *Psychrometric Chart*

Pada *Psychrometric Chart*, terdapat berbagai properti yang dapat mendefinisikan tingkatan keadaan udara pengering. Pada Gambar 2.6, terlihat adanya 5 properti tersebut, antara lain *dry bulb temperature*, *wet bulb temperature*, *dew point temperature*, *relative humidity* dan *humidity ratio*. Selain itu, terdapat pula 2 proses yang terjadi pada udara pengering dan dapat di Analisis dengan menggunakan prinsip *psychrometric chart*.

2.7.1 Dry Bulb Temperature

Dry bulb temperature (T_{DB}), biasanya juga disebut air temperature, merupakan properti udara yang paling umum digunakan. Ketika orang merujuk pada suhu udara, mereka biasanya merujuk pada *Dry bulb temperature*. *Dry bulb temperature* pada dasarnya mengacu pada suhu udara sekitar.

Dry bulb temperature disebut sebagai *dry bulb* dikarenakan suhu yang ditunjukkan tidak terpengaruh oleh kelembaban udara. *Dry bulb temperature* dapat diukur dengan menggunakan thermometer normal yang terpapar bebas ke udara dengan ujung sensor dalam keadaan kering dan terlindung dari radiasi. *Dry bulb temperature* merupakan indikator dari kadar panas.

2.7.2 Wet Bulb Temperature

Wet bulb temperature (T_{WB}) merupakan temperatur saturasi adiabatic. Temperatur ini merupakan temperatur yang ditunjukkan oleh termometer dengan bohlam yang dibasahkan dan dipaparkan ke aliran udara yang diukur. *Wet bulb temperature* umumnya memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan *dry bulb temperature*.

Dengan nilai yang lebih rendah tersebut, *wet bulb temperature* mengindikasikan penguapan adiabatik air dari termometer dan efek pendinginan oleh karena air tersebut. Tingkat penguapan dari air pada bohlam dan perbedaan nilai pada *dry bulb temperature* dan *wet bulb temperature* dipengaruhi oleh kelembaban udara. Oleh karena itu, udara yang memiliki *relative humidity* (RH) 100%, akan memiliki nilai *dry bulb temperature* dan *wet bulb temperature* yang identik.

2.7.3 Dew Point Temperature

Dew point temperature (T_{DP}) merupakan temperatur dimana uap air mulai mengembun dari udara yang diukur. *Dew point temperature* dapat juga didefinisikan sebagai temperatur dimana udara menjadi sepenuhnya jenuh. Apabila temperatur *dew point temperature* dekat dengan *dry bulb temperature*, maka *relative*

humidity relatif tinggi. Sebaliknya, apabila *dew point temperature* jauh di bawah *dry bulb temperature*, maka nilai *relative humidity* relatif rendah.

Secara sederhana, apabila anda mengeluarkan botol berisi air dingin dari dalam kulkas, dan pada bagian permukaan botol tersebut terbentuk embun, maka *dew point temperature* udara sekitar lebih tinggi dari temperatur di dalam kulkas. *Dew point temperature* dapat diukur dengan mengisi kaleng logam dengan air dan beberapa es batu. Kemudian aduk dengan menggunakan thermometer dan perhatikan bagian luar kaleng. Ketika embun mulai terkumpul pada bagian luar kaleng, maka temperatur yang ditunjukkan oleh thermometer telah cukup dekat dengan *dew point temperature* yang sebenarnya.

2.7.4 *Relative Humidity* (ϕ)

Relative humidity (ϕ) merupakan parameter yang menunjukkan banyaknya uap air yang terkandung pada udara dalam fase gas. *Relative humidity* memiliki definisi sebagai rasio antara fraksi molekul uap air dalam udara basah, berbanding dengan fraksi molekul uap air maksimal/jenuh pada temperatur dan tekanan yang sama. *Relative humidity* dinyatakan dalam bentuk persentase.

Persamaan yang menyatakan besaran *relative humidity* dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (2.25)$$

dengan:

ϕ = *relative humidity* (%)

P_v = tekanan parsial uap air dalam udara basah (Pa)

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

Selain *relative humidity*, terdapat 2 parameter lain yang juga dapat menunjukkan banyaknya uap air yang terkandung pada udara dalam fase gas. Kedua parameter tersebut adalah *specific humidity* dan *absolute humidity*. *Specific humidity* (γ) merupakan rasio

antara massa uap air dengan total massa udara dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\gamma = \frac{M_w}{M_w + M_{da}} \quad (2.26)$$

dengan:

γ = *specific humidity* (%)

M_w = massa uap air yang terkandung ($\text{kg}_{\text{uap air}}$)

M_{da} = massa udara kering ($\text{kg}_{\text{udara kering}}$)

Selain itu, *absolute humidity* (d_v) merupakan banyaknya jumlah massa uap air yang terdapat pada volume sampel. Persamaan yang menyatakan nilai *absolute humidity* dinyatakan sebagai berikut:

$$d_v = \frac{M_w}{V} \quad (2.27)$$

dengan:

d_v = *absolute humidity* (gr/m^3)

M_w = massa uap air ($\text{gram}_{\text{uap air}}$)

V = volume total sampel (m^3)

2.7.5 Humidity Ratio (ω)

Humidity Ratio merupakan rasio kelembaban antara massa uap air dan massa udara kering yang terkandung didalam udara pada volume, tekanan dan temperatur tertentu. Untuk mengetahui nilai *humidity ratio*, dapat dipergunakan persamaan sebagai berikut:

$$\omega = \frac{m_w}{m_{da}} = \frac{P_w V / R_w T}{P_{da} V / R_{da} T} = \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right) \left(\frac{R_{da}}{R_w} \right) \quad (2.28)$$

$$\omega = \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right) \left(\frac{M_w}{M_{da}} \right) = \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right) \left(\frac{18}{28.96} \right) \quad (2.29)$$

$$\omega = 0.622 \left(\frac{P_w}{P_{da}} \right) \quad (2.30)$$

dengan:

ω = rasio kelembaban $\text{kg}_{\text{uap air}}/\text{kg}_{\text{udara kering}}$)

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

m_{da} = massa udara kering ($\text{kg}_{\text{udara kering}}$)

P_w = tekanan parsial uap air (Pa)

P_{da} = tekanan parsial uap udara kering (Pa)

P = tekanan atmosfer (Pa)

R_w = konstanta gas untuk uap air (461,5 J/kg.K)

R_{da} = konstanta gas untuk udara kering (287 J/kg.K)

Hukum Dalton menyatakan bahwa besarnya tekanan atmosfer merupakan penjumlahan antara tekanan parsial udara kering dan tekanan parsial uap air ($P = P_{da} + P_w$). Oleh karena itu, persamaan rasio kelembaban udara dapat ditulis ulang sehingga menjadi:

$$\omega = 0.622 \left(\frac{P_w}{P - P_w} \right) \quad (2.32)$$

dengan:

ω = rasio kelembaban $\text{kg}_{\text{uap air}}/\text{kg}_{\text{udara kering}}$)

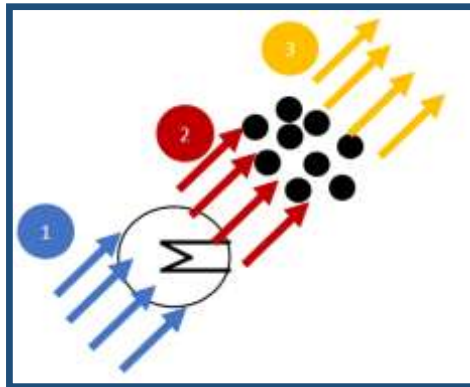
P_w = tekanan parsial uap air (Pa)

P = tekanan atmosfer (Pa).

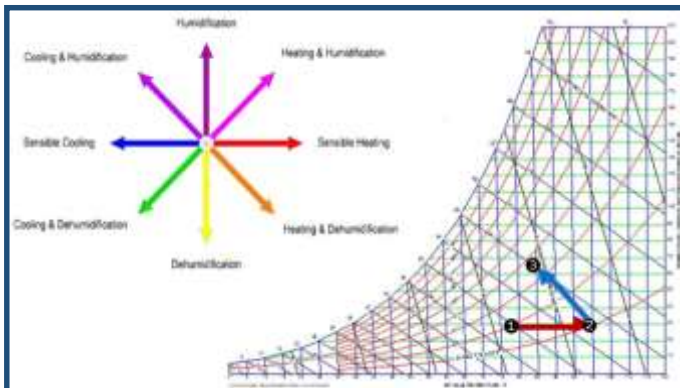
Sementara itu, rasio kelembaban menurut sistem *British*, dapat dinyatakan dalam grains, dimana 7 grains uap air per lbm udara kering setara dengan 1 gram uap air per kg udara kering.

2.7.6 Proses yang terjadi pada udara pengering *Fluidized Bed Dryer*

Terdapat 2 proses yang terjadi pada udara pengering di dalam *fluidized bed dryer*. Proses ini antara lain proses pemanasan dan proses humidifikasi. Kedua proses tersebut dapat terlihat pada gambar 2.8 dan gambar 2.9.



Gambar 2. 8 Ilustrasi proses pemanasan dan humidifikasi



Gambar 2. 9 Proses Pemanasan dan Humidifikasi pada

Psychrometric Chart
Sumber: (Moran, 2014)

Keterangan:

- a. Proses Pemanasan dan Pendinginan (*sensible heating* dan *sensible cooling*)

Pemanasan merupakan proses penambahan kalor sensibel ke udara sehingga menyebabkan kenaikan temperatur udara. Sebaliknya, pendinginan merupakan proses pengurangan kalor sensibel dari udara sehingga menyebabkan penurunan temperatur udara. Proses pemanasan terjadi ketika udara panas melewati elemen-elemen pemanas pada *heat exchanger*. Sedangkan, proses pendinginan terjadi ketika udara melewati partikel-partikel batubara sehingga terjadi proses konveksi. Pada Gambar 2.7, ilustrasi proses pemanasan ditunjukkan oleh panah berwarna merah dari angka 1 ke 2, sementara proses pendinginan yang disertai humidifikasi ditunjukkan oleh panah berwarna biru dari angka 2 ke 3.

- b. Proses Humidifikasi (*humidification*)

Humidifikasi merupakan proses penambahan jumlah uap air pada udara sehingga udara mengalami kenaikan nilai *humidity ratio*. Proses ini sebenarnya dapat terjadi tanpa disertai perpindahan kalor sensibel sekalipun, namun pada *fluidized bed dryer*, proses humidifikasi pada udara pengering disertai dengan proses *sensible cooling*. Proses humidifikasi terhadap udara terjadi saat udara pengering melewati partikel-partikel batubara sehingga membawa sebagian *moisture* dari partikel batubara tersebut. Pada Gambar 2.7, ilustrasi proses humidifikasi ditunjukkan oleh panah berwarna biru dari angka 2 ke 3.

Pada dasarnya, Gambar 2.5 dan Gambar 2.7 menunjukkan ilustrasi pada proses yang sama. Pada proses 1 ke 2 terjadi proses pemanasan (*sensible heating*) dimana terjadi kenaikan nilai *dry bulb temperature* pada udara pengering. Proses ini ditandai dengan panah biru dan merah pada Gambar 2.5, dan panah biru pada Gambar 2.7. Sedangkan, pada proses 2 ke 3, terjadi proses

humidifikasi (*humidification*) dan pendinginan (*sensible cooling*) yang menyebabkan terjadinya kenaikan *humidity ratio* juga penurunan *dry bulb temperature* pada udara pengering. Proses ini ditandai dengan panah merah dan kuning pada Gambar 2.5, dan panah merah pada Gambar 2.7. Proses humidifikasi menyebabkan perpindahan letak kondisi udara pada *psychrometric chart* ke atas, sementara proses pendinginan menyebabkan perpindahan letak kondisi udara pada *psychrometric chart* ke kiri. Karena pada proses 2-3 dalam waktu yang bersamaan udara mengalami proses humidifikasi dan pendinginan, maka garis merah pada Gambar 2.7 menjadi miring dengan gradien tertentu ke kiri atas.

Berdasarkan prinsip *psychrometric chart*, diameter dan konfigurasi dari *perforated plate bed* berpengaruh pada peningkatan *humidity ratio* dan penurunan *dry bulb temperature* pada udara pengering. Hal ini dapat terjadi karena semakin kecil *cross sectional area* pada *perforated plate bed*, menyebabkan kecepatan udara pengering yang semakin tinggi. Nilai kecepatan udara yang lebih tinggi juga mempengaruhi nilai perpindahan panas dan massa yang terjadi, sehingga nilai *humidity ratio* dan *dry bulb temperature* juga akan berbeda.

2.8 Aspen Plus

Aspen Plus merupakan salah satu dari berbagai jenis process simulation software. Aspen Plus dapat digunakan untuk melakukan kajian dan kalkulasi dari sebuah proses secara kimiawi dan termodinamika. Hal-hal yang dapat dilakukan oleh Aspen Plus adalah sebagai berikut:

1. Simulasi proses dasar.
2. *Phase equilibria (vapor-liquid, liquid-liquid, dan vapor-liquid-liquid)*.
3. Regresi data termodinamika.
4. Analisis tingkat keadaan (*pure fluids dan mixtures*).
5. *NIST TDE (thermodynamics data engine)*.
6. *Property Method Selection Assistant*.

7. Distilasi dan ekstraksi sederhana.

Kemudian kalkulasi pada aplikasi *Aspen Plus* dilakukan berdasarkan pada:

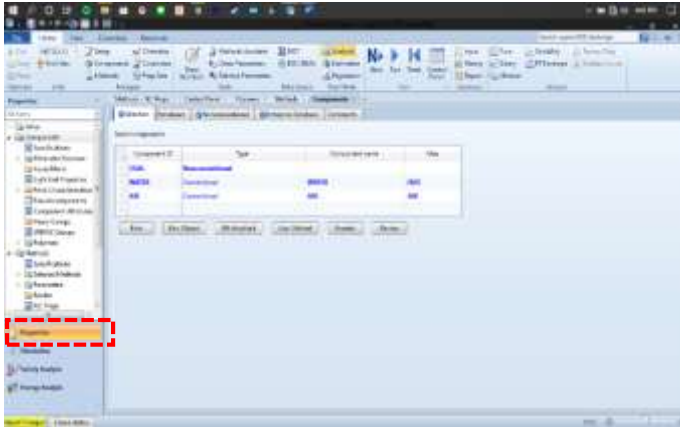
1. Persamaan kesetimbangan dari *extensive properties* termodinamika seperti masa, mol dan energy.
2. Hubungan termodinamika untuk *reacting* dan *non-reacting medium*, seperti perbedaan fasa dan kesetimbangan kimia.
3. Persamaan momentum, perpindahan panas, dan perpindahan masa.
4. Reaksi *stoichiometry* dan *kinetic data*.
5. *Physical constrain* yang digunakan pada proses.^[13]

Dalam melakukan simulasi pada *Aspen Plus*, terdapat berbagai langkah yang harus ditempuh. Langkah tersebut antara lain sebagai berikut.

2.8.1 Penentuan Properties

Dalam melakukan simulasi di aplikasi *Aspen Plus*, pada mulanya ditentukan terlebih dahulu properties simulasi. Pada bagian *properties*, dapat ditentukan jenis komponen yang dipergunakan dalam simulasi, berikut juga tipe komponen tersebut. Pemilihan komponen dapat terlihat pada gambar 2.10. Tipe komponen *conventional* merupakan material murni (*pure*) yang berbentuk *mixture*/campuran atau dalam *chemical equilibrium*/kesetimbangan kimia. Contoh tipe komponen *conventional* adalah NaCl atau garam. Material *conventional* terkarakterisasi dalam properti seperti berat molekul, tekanan uap air, dan lain-lain. Komponen *conventional* tersebut dapat diperoleh dari *Aspen Plus databanks*, atau dengan mengimpor data ke *software Aspen Plus*. Berbeda dengan material *conventional*, *non-conventional* (NC) merupakan material yang terkarakterisasi dalam faktor empiris yang disebut *component attributes*. Material NC tidak berpartisipasi dalam perhitungan kesetimbangan kimia dalam *Aspen Plus*, akan tetapi tetap dapat diproses secara

mekanikal. Contoh dari material NC dalam Aspen Plus adalah *coal*/batubara dan *wood pulp*/bubur kayu.



Gambar 2. 10 Pemilihan *component* pada *properties* simulasi Aspen Plus

Selanjutnya bentuk pengukuran parameter fisik dari NC *solids* dalam *enthalpy* dan *density* dapat didefinisikan. Aspen Plus memberikan berbagai jenis pilihan termasuk jenis definisi batubara. Pilihan tersebut dapat terlihat pada tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Pilihan NC Solid Property Model Aspen Plus

Nonconventional Solid Property Models		
General Enthalpy and Density Models	Model name	Phase(s)
General density polynomial	DNSTYGEN	S
General heat capacity polynomial	ENTHGEN	S
Enthalpy and Density Models for Coal and Char		
General coal enthalpy model	HCOALGEN	S
IGT coal density model	DCOALIGT	S
IGT char density model	DCHARIGT	S

Selanjutnya adalah pengaturan *methods*. Pada pemilihan *methods*, dapat ditentukan jenis metode perhitungan yang akan dijalankan oleh aplikasi Aspen Plus. Untuk *coal processing*, Aspen Plus menyarankan untuk menggunakan salah satu dari 3 metode yaitu SOLIDS, PR-BM dan RKS-BM.

1. SOLIDS

Metode SOLIDS pada Aspen Plus didesain untuk memenuhi berbagai tipe *solid processing*, antara lain *coal processing*, *pyrometallurgical processes*, serta berbagai tipe *solid processing* lainnya. Pada metode SOLIDS, perhitungan properties material dalam fase fluida dan padat dibedakan, sehingga tipe *stream* dapat terbagi menjadi 3, yaitu MIXED, CISOLID serta NC. Pada proses mekanika dengan menggunakan metode ini, *physical properties* dari material dapat memperhitungkan sifat material sebagai NC.

2. PR-BM

Metode PR-BM menggunakan *Peng-Robinson cubic equation* dengan fungsi Boston-Mathias alpha untuk seluruh *thermodynamic properties*. Metode PR-BM direkomendasikan untuk *gas-processing*, *refinery*, dan aplikasi petrokimia. Contohnya adalah *gas plants*, *crude towers*, dan *ethylene plants*. Metode PR-BM dapat digunakan untuk tipe *stream* MIXED berupa campuran polar atau hampir polar, seperti hidrokarbon.

3. RKS-BM

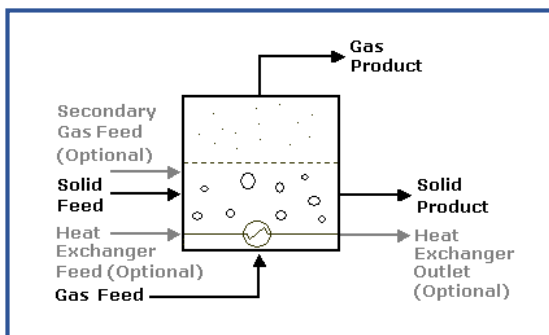
Metode RKS-BM menggunakan *Redlich-Kwong-Soave (RKS) cubic equation of state* dengan fungsi *Boston-Mathias alpha* untuk seluruh *thermodynamic properties*. Metode RKS-BM direkomendasikan untuk *gas-processing*, *refinery*, dan aplikasi petrokimia. Contohnya adalah *gas plants*, *crude towers*, dan *ethylene plants*. Metode RKS-BM dapat digunakan untuk tipe *stream*

MIXED berupa campuran polar atau hamper polar, seperti hidrokarbon.

2.8.2 Penentuan Simulasi

Setelah seluruh penentuan *properties* untuk simulasi telah selesai, maka selanjutnya adalah mendefinisikan simulasi yang akan dilakukan. Definisi simulasi yang akan dilakukan terdiri dari penentuan *process flowsheet* serta penentuan *properties stream* dan *block*. *Process flowsheet* merupakan penggambaran sederhana proses yang diinginkan berikut aliran materialnya. Setelah *process flowsheet* selesai dikerjakan, dapat ditentukan *properties* dari *stream* dan *block* yang ada. Setelah itu simulasi dapat dijalankan. Hasil simulasi dapat terlihat pada *stream* yang diinginkan.

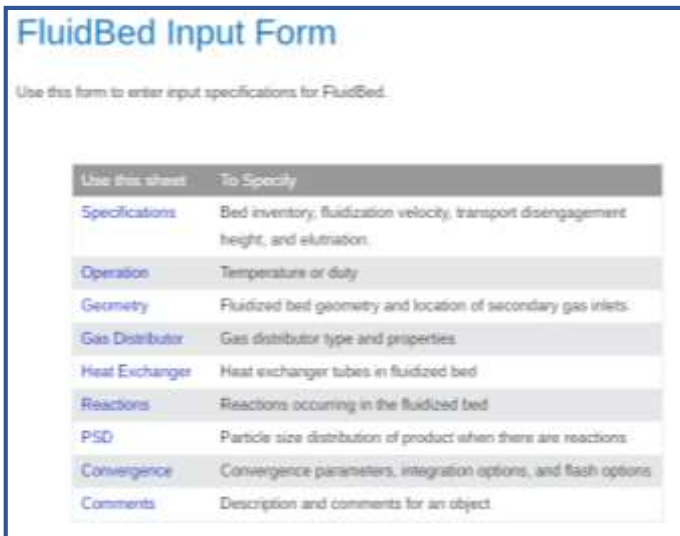
Pada aplikasi Aspen Plus, terdapat tipe *block* yang dapat mengakomodasi proses pengeringan batubara dengan *fluidized bed dryer*, yaitu *block fluidbed*. *Block fluidbed* pada Aspen Plus memiliki 4 *connectivity* pada *process flowsheet* yang harus dipenuhi, yaitu *Gas Feed*, *Gas Product*, *Solid Feed* dan *Solid Output*, dan 4 *connectivity* yang bersifat opsional, yaitu *Secondary Gas Feed*, *Heat Exchanger Feed* dan *Heat Exchanger Outlet*. Ilustrasi yang diberikan oleh Aspen Plus V10 Help dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Ilustrasi *process flowsheet* dari *fluidbed* pada Aspen Plus

Dalam penggunaannya terdapat beberapa parameter yang dapat dilengkapi agar simulasi dapat dilaksanakan. Parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.9. Terdapat 3 parameter yang harus dilengkapi agar fluidbed dapat merepresentasikan fluidized bed dryer pada kondisi nyata. Parameter tersebut antara lain *Specifications*, *Geometry*, dan *Gas Distributor*.

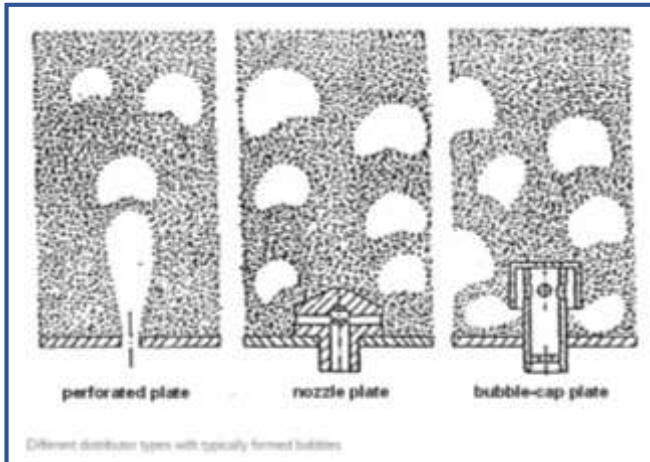
Tabel 2. 9 Parameter dari *fluidbed* pada *Aspen Plus*



Use this sheet	To Specify
Specifications	Bed inventory, fluidization velocity, transport disengagement height, and elutriation.
Operation	Temperature or duty
Geometry	Fluidized bed geometry and location of secondary gas inlets.
Gas Distributor	Gas distributor type and properties
Heat Exchanger	Heat exchanger tubes in fluidized bed
Reactions	Reactions occurring in the fluidized bed
PSD	Particle size distribution of product when there are reactions
Convergence	Convergence parameters, integration options, and flash options
Comments	Description and comments for an object

Pada input *Geometry*, terdapat 3 tipe *plate* yang dapat digunakan dalam *block fluidbed*. *Plate* tersebut terletak dibawah material yang akan dikeringkan dan berfungsi sebagai pengarah aliran udara sebelum melakukan kontak dengan material. 3 tipe *plate* padat tersebut antara lain *perforated plate*, *nozzle plate* dan *bubble-cap plate*. Pada penggunaannya, dapat dilakukan input berupa discharge coefficient atau pressure drop. Akan tetapi, kedua nilai ini hanya dapat diketahui melalui eksperimen. Apabila tidak dapat diketahui karena berbagai alasan, Aspen Plus v10 juga memberikan rekomendasi nilai discharge coefficient 0,8 untuk

perforated plate. Ilustrasi yang diberikan oleh Aspen Plus V10 Help terhadap 3 tipe *plate* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Ilustrasi 3 tipe plate pada *fluidbed*

Pada penggunaannya, Aspen Plus memakai berbagai persamaan empiris sebagai penyelesaian terhadap berbagai permintaan yang diajukan oleh pengguna. Beberapa persamaan yang digunakan dalam proses pengeringan dan pemanasan antara lain adalah persamaan perpindahan panas serta perpindahan massa. Berikut merupakan persamaan perpindahan panas yang digunakan dalam aplikasi Aspen Plus yang bersumber dari Aspen Plus v10 Help.

$$\dot{Q} = \alpha_G \cdot A_p \cdot (T_G - T_S) \quad (2.33)$$

dengan:

\dot{Q} = heat flow rate

α_G = gas-to-particle heat transfer coefficient

A_p = surface area dari 1 partikel

T_G = temperatur gas

T_S = temperatur solid material

dimana area perpindahan panas didapatkan dengan persamaan berikut

$$A_p = \sum_{i=1}^n \dot{X}_i \cdot \pi \cdot d_{p,i}^2 \quad (2.34)$$

dengan:

A_p = *surface area* dari 1 partikel

\dot{X}_i = *heat transfer coefficient*

$d_{p,i}$ = diameter partikel material padat

Sementara itu, untuk perpindahan massa, Aspen Plus menggunakan persamaan empiris sebagai berikut

$$\beta_{G,0} = \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \cdot \frac{Sh \cdot \delta_G}{d_{p,i}} \quad (2.35)$$

dengan:

$\beta_{G,0}$ = mass transfer coefficient

\dot{x}_i = *mass fraction* dari partikel padat

Sh = *Sherwood number*

δ_G = *Diffusion coefficient* dari uap air pada gas

$d_{p,i}$ = Diameter partikel rata-rata

Aspen Plus v10 memperoleh nilai Sherwood Number untuk aliran laminar dan turbulen dengan persamaan berikut

$$Sh_{lam} = 0.664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Sc} \quad (2.36)$$

$$Sh_{turb} = \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr}{1 \pm 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.37)$$

dengan:

Sh_{lam} = *Sherwood number* untuk aliran *laminar*

Sh_{turb} = *Sherwood number* untuk aliran *turbulent*

Re = *Reynolds number*

Sc = *Schmidt number*

Pr = *Prandl number*

dimana untuk nilai-nilai dimensionless seperti *Reynolds number*, *Schmidt number* serta *Prandl number*, diperoleh oleh Aspen Plus v10 dengan persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{u_G \cdot d_p \cdot \varphi_G}{n_G} \quad (2.38)$$

$$Sc = \frac{n_G}{\delta \cdot \varphi_G} \quad (2.39)$$

$$Pr = \frac{n_G \cdot C_{p,G}}{\lambda_G} \quad (2.40)$$

dengan:

Re = *Reynolds number*

Sc = *Schmidt number*

Pr = *Prandl number*

u_G = *Gas inlet velocity*

d_p = *Diameter partikel material padat*

φ_G = *Density of dry gas*

n_G = *Dynamic viscosity of the dry gas*

δ = *Diffusion coefficient of the vapor in gas*

$C_{p,G}$ = *Specific heat capacity of the dry gas*

λ_G = *Thermal conductivity of the gas*

Akan tetapi, aplikasi Aspen Plus memiliki beberapa keterbatasan dalam penggunaannya dalam mengakomodasi *fluidized bed dryer* sebagai pengering batubara. Keterbatasan pertama adalah fluida pengering yang masuk melalui *gas feed* harus memiliki kecepatan diatas kecepatan fluidisasi. Selain itu, material yang dikeringkan harus berbentuk aliran alias tidak dapat tetap berada di dalam *chamber* sehingga proses pengeringan tidak dapat dilakukan dengan *transient*.

2.9 Penelitian Terdahulu

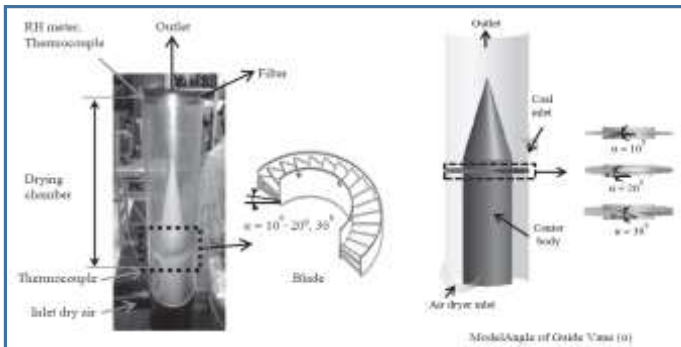
Telah terdapat berbagai penelitian tentang *fluidized bed coal dryer* yang pernah dilakukan sebelumnya. Berikut merupakan 2

dari sekian banyak penelitian sebelumnya yang penulis jadikan bahan pembelajaran sebagai dasar kajian pustaka:

2.9.1 Penelitian Simanjuntak 2018

Experimental and numerical study of coal swirl fluidized bed drying on different angle of guide vane

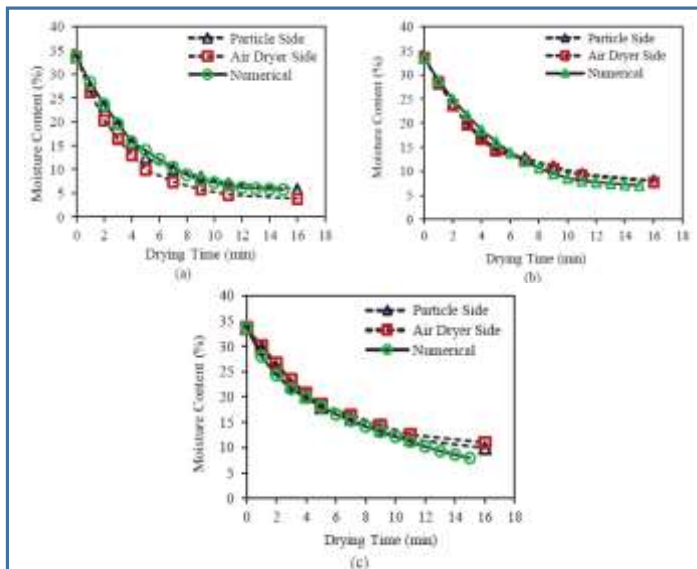
Penelitian ini dilakukan oleh Melvin Simanjuntak dkk di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui pengaruh sudut blade terhadap laju pengeringan batubara dengan variasi sudut blade 10° , 20° , dan 30° . Penelitian ini dilakukan dalam 2 metode, yaitu eksperimen dan simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Gambar 2.10 menunjukkan profil bed yang digunakan pada penelitian secara simulasi dan eksperimen oleh Melvin Simanjuntak.



Gambar 2. 13 Profil *bed* dari pengering penelitian Simanjuntak
Sumber: (M. E. Simanjuntak, 2018)

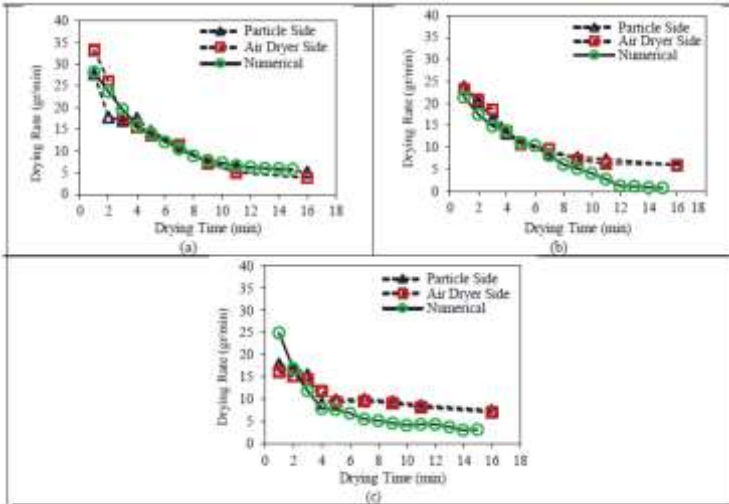
Penelitian ini menghasilkan kadar moisture content serta drying rate batubara pada setiap menit pengeringan. Pada penelitian ini, Melvin Simanjuntak membandingkan hasil eksperimen dari sisi material yang dikeringkan dan udara pengering, serta hasil perhitungan secara numerik. Hasil penelitian

ini dapat dilihat pada gambar 2.11 untuk moisture content, dan gambar 2.12 untuk drying rate.



Gambar 2. 14 Grafik persentase moisture content berdasarkan fungsi waktu dengan sudut blade (a) 10°, (b) 20°, (c) 30° penelitian Simanjuntak

Sumber: (M. E. Simanjuntak, 2018)



Gambar 2. 15 Grafik drying rate berdasarkan fungsi waktu dengan sudut blade (a) 10°, (b) 20°, (c) 30° penelitian Simanjuntak
Sumber: (M. E. Simanjuntak, 2018)

Pada gambar 2.11, terlihat bahwa grafik moisture content berdasarkan fungsi waktu pada ketiga jenis sudut blade memiliki trendline menurun seiring bertambahnya waktu pengeringan hingga menit ke-16. Dapat diketahui bahwa penurunan moisture content batubara terjadi lebih cepat pada menit-menit awal pengeringan, kemudian semakin landai seiring lamanya pengeringan. Hal ini dapat terjadi karena moisture dari batubara yang dapat dibawa oleh udara pengering semakin sedikit seiring dengan lamanya pengeringan. Pada menit ke-1 hingga menit ke-6 pengeringan, terlihat bahwa kurva menurun tajam. Hal ini disebabkan karena moisture content di batubara yang masih tinggi. Pada menit-menit berikutnya dapat terlihat bahwa penurunan moisture content tidak terlalu signifikan lagi. Hal ini dikarenakan moisture content pada batubara yang telah menipis sehingga laju

perpindahan moisture content dari rongga-rongga kapiler batubara ke permukaan batubara juga menurun.

Pada gambar 2.12, juga terlihat bahwa grafik drying rate berdasarkan fungsi waktu pada ketiga jenis sudut blade memiliki trendline menurun seiring bertambahnya waktu. Hal ini dikarenakan grafik drying rate merupakan hasil development dari grafik moisture content. Pengurangan moisture content yang semakin kecil setiap menit pengeringan, menyebabkan grafik laju pengeringan yang juga semakin kecil.

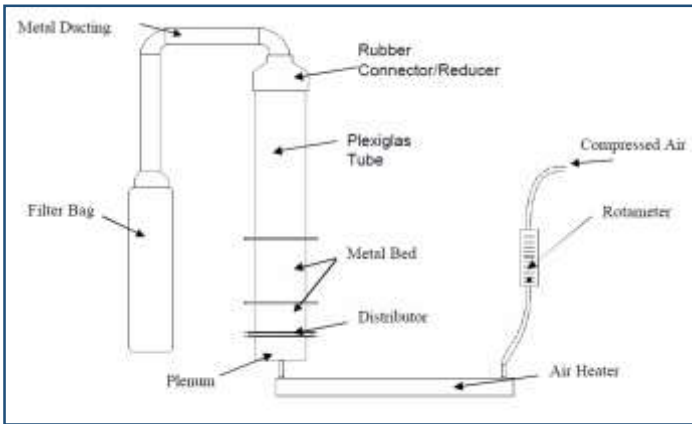
Berdasarkan gambar 2.11 dan 2.12, kita juga dapat mengetahui bahwa dengan pengeringan selama 16 menit, batubara yang memiliki moisture content terendah adalah batubara yang dimasukkan ke dalam fluidized bed dryer dengan bed yang memiliki vane dengan sudut 10° , kemudian diikuti 20° dan 30° . Hal ini disebabkan karena vane dengan sudut yang lebih kecil, memiliki cross sectional area yang lebih kecil. Dengan cross sectional area yang lebih kecil, maka kecepatan aliran udara pengering menjadi lebih besar. Oleh karena itu, maka laju perpindahan panas dan massa menjadi lebih besar.

2.9.2 Penelitian Edward K. Levy 2006

Use of coal drying to reduce water consumed in pulverized coal power plants

Penelitian ini dilakukan oleh Edward K. Levy dkk di Energy Research Center, Lehigh University, Pennsylvania, Amerika Serikat. Penelitian ini dimulai pada 2 Desember 2002 dan berakhir pada 31 Maret 2006. Penelitian ini dilakukan untuk meneliti dugaan terhadap beberapa faktor yang berpengaruh dalam laju pengeringan batubara. Faktor-faktor tersebut antara lain ukuran partikel batubara, kecepatan udara pengering, suhu *tube heater* dan kandungan air dalam udara pengering. Pada penelitian ini, digunakan batubara jenis *lignite* dan batubara *subbituminous* yang

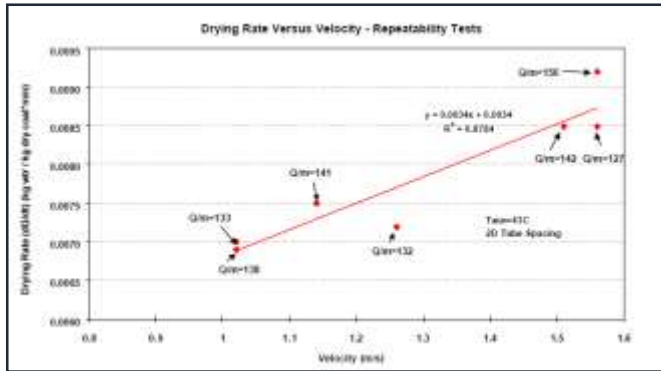
didapatkan dari *powder basin river* (PBR). Berbagai variabel tersebut diuji satu per satu. Skema pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 2.13.



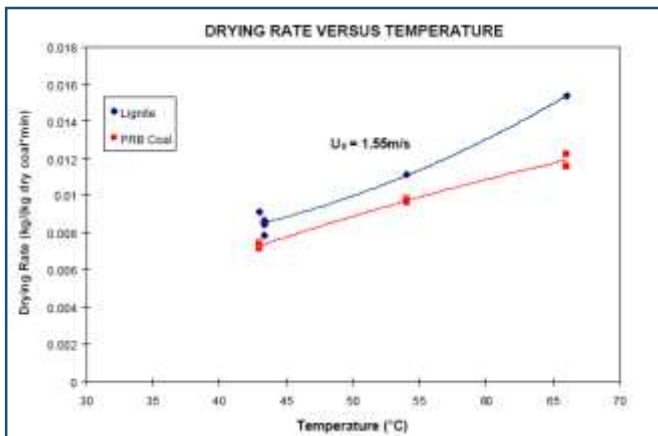
Gambar 2. 16 Skema alat eksperimen penelitian Edward K. Levy 2006

Sumber: (E. K. Levy, 2002)

Penelitian ini menghasilkan beragam data dengan berbagai variasi percobaan yang dilakukan pada variabel percobaan yang telah disebutkan. Beberapa grafik yang menjadi sorotan utama adalah pengaruh kecepatan udara pengering serta pengaruh temperatur udara pengering. Grafik pengaruh kecepatan udara pengering terhadap drying rate batubara dapat dilihat pada gambar 2.14. Sedangkan, grafik pengaruh temperatur udara pengering terhadap drying rate batubara dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2. 17 Grafik pengaruh kecepatan udara pengering terhadap drying rate penelitian Edward K. Levy 2006
Sumber: (E. K. Levy, 2002)



Gambar 2. 18 Grafik pengaruh temperatur udara pengering terhadap drying rate penelitian Edward K. Levy 2006
Sumber: (E. K. Levy, 2002)

Berdasarkan gambar 2.14, diketahui bahwa kecepatan udara pengering memiliki pengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Berdasarkan trendline dari grafik tersebut, diketahui bahwa

pengaruh tersebut bersifat linear. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, maka semakin tinggi pula laju pengeringan batubara.

Pada gambar 2.15, juga diketahui bahwa temperatur udara pengering yang memasuki drying chamber juga memiliki pengaruh terhadap laju pengeringan batubara. Berbeda dengan kecepatan udara, pengaruh temperatur terlihat tidak memiliki trendline yang linear. Akan tetapi, dapat ditarik kesimpulan pula bahwa semakin tinggi temperatur udara pengering, semakin tinggi pula laju pengeringan batubara.

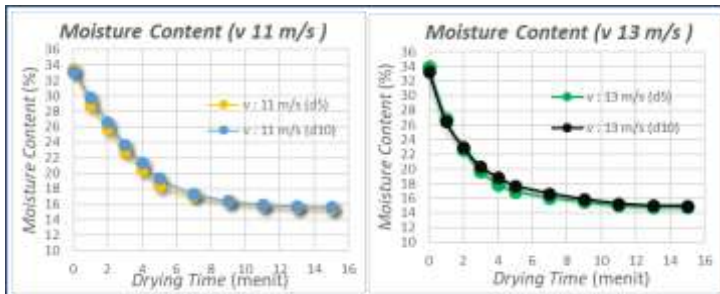
2.9.3 Penelitian N. H. Tri 2018

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

Penelitian ini dilakukan oleh Nugroho Hutomo Tri pada tahun 2018 bertempat di S-1 Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh bentuk perforated plate dan kecepatan udara diatas kecepatan fluidisasi terhadap kinerja Fluidized Bed Dryer dalam fungsinya sebagai pengering batubara. Pelaksanaan eksperimen ini dilakukan menggunakan serangkaian alat yang didesain untuk mengeringkan batubara dengan udara yang berperan sebagai media pengering. Dengan memodifikasi diameter lubang *perforated plate* (5 mm dan 10 mm) di dalam *drying chamber* pada *bed coal dryer*. Kecepatan udara pengeringan divariasikan pada 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s. Beban pengeringan pada tiap variasi sebesar 300 gram. Batubara terlebih dahulu dipecahkan menjadi bentuk granular dengan rata-rata diameter sebesar $\pm 6,5$ mm. Pengambilan sampel batubara dilakukan tiap 1 menit hingga menit ke-5 kemudian dilanjutkan hingga menit ke-15 dengan interval 2 menit. Selanjutnya, untuk mendapatkan nilai *moisture content* pada batubara maka akan dilakukan pengeringan

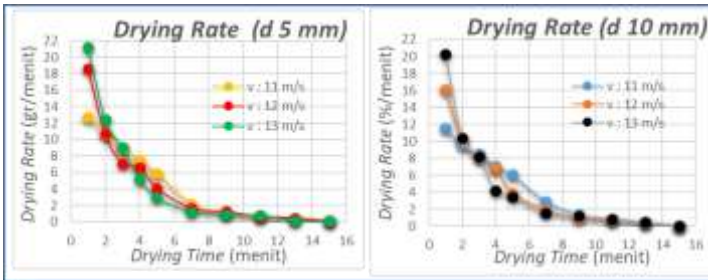
lebih lanjut menggunakan oven pada temperatur 105°C selama 180 menit.

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



Gambar 2. 19 Moisture Content vs Drying Time kecepatan pengeringan 11m/s dan 13m/s pada 2 tipe perforated plate penelitian N. T. Hutomo 2018

Sumber : (Tri, 2018)



Gambar 2. 20 Drying Rate vs Drying Time tipe perforated 5mm dan 10mm pada 3 jenis kecepatan pengeringan penelitian Widarwis 2018

Sumber: (Tri, 2018)

Kesimpulan pada penelitian ini adalah kecepatan pengeringan berbanding lurus dengan kecepatan udara pengering dimana kecepatan pengeringan tertinggi dicapai oleh udara dengan kecepatan alir 13m/s. Selain itu, bentuk perforated plate dengan ukuran diameter orifice 5mm menghasilkan kecepatan pengeringan yang sedikit lebih baik disebabkan oleh luas *open-area* yang sama, namun distribusi lubang yang lebih merata dan saling berdekatan sehingga udara pengering yang melewati bed tersebut mampu mengangkat air pada batubara secara lebih banyak dan menyeluruh.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Adapun tahapan yang dilakukan dalam melakukan simulasi *Perforated Plate Fluidized Bed Coal Dryer* adalah sebagai berikut:

1. Studi Kasus & Literatur

Dilakukan identifikasi permasalahan terkait penggunaan sumberdaya dan cadangan batubara di Indonesia khususnya yang memiliki nilai kalor rendah (*low-rank coal*) pada PLTU Batubara sehingga berpotensi menyebabkan penurunan reliabilitas dan availabilitas unit pembangkitan. Selain itu, juga dilakukan studi literatur dan jurnal lokal maupun internasional untuk mengetahui dan memahami hal berikut:

- a. Karakteristik dan komposisi *low-rank coal*
- b. Prinsip perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan batubara
- c. Prinsip kerja dari *perforated plate fluidized bed coal dryer*.
- d. Karakteristik udara pada *psychrometric chart*.

2. Permodelan dan Simulasi *Perforated Plate Fluidized Bed Coal Dryer* dengan Software Aspen Plus

Dilakukan permodelan *perforated plate fluidized bed coal dryer* dengan software Aspen Plus. Model yang digunakan pada simulasi adalah *dryer*. Pada simulasi, digunakan 2 jenis *perforated plate*, yaitu Tipe A dengan orifice berjumlah 80 serta berdiameter 10mm, serta Tipe B dengan orifice berjumlah 325 serta berdiameter 5mm. Simulasi dilakukan dengan 5 variasi kecepatan udara masuk, yaitu 4m/s, 6m/s, 8m/s, 10m/s dan 12m/s. Simulasi dilakukan secara *steady state* dengan pengamatan penurunan *moisture content* batubara setiap 1 menit selama 15 menit.pengeringan.

3. Pengolahan dan Analisis Data Hasil Simulasi
 Hasil simulasi dengan software Aspen Plus akan disajikan dalam tabel dan grafik. Data yang diperoleh akan berupa moisture content, temperatur dan nilai LHV batubara, serta drying rate dan karakteristik udara pengering yang dapat dilihat dari psychrometric chart. Hasil yang diperoleh akan dibandingkan dengan perhitungan perpindahan panas dan massa secara manual untuk memperoleh hasil yang akurat.
4. Penulisan Laporan
 Semua hasil simulasi dengan menggunakan Software Aspen Plus dan Analisis yang dilakukan akan dituangkan dalam sebuah laporan yang disusun secara sistematis serta menyesuaikan dengan panduan tugas akhir di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

3.2 Simulasi Aspen Plus

Permodelan dilakukan dengan menggunakan *dryer*. Tahapan permodelan pada Aspen Plus dijabarkan dalam langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pemilihan fluida kerja simulasi



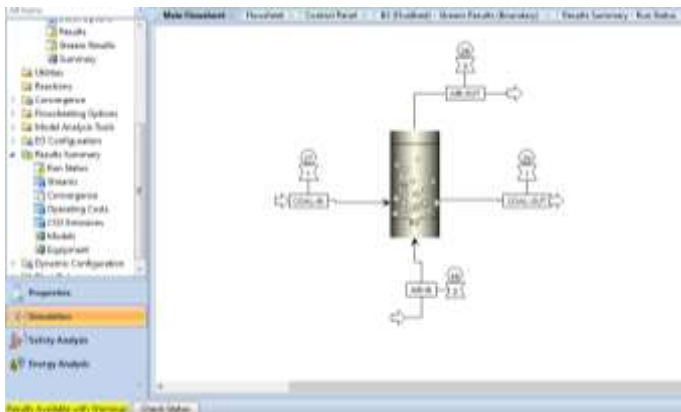
Gambar 3. 1 Pemilihan fluida kerja

2. Pemilihan model *equation of state* dengan base method SOLIDS sebagai metode yang direkomendasikan oleh Aspen Plus dalam coal processing



Gambar 3. 2 Pemilihan model *equation of state*

3. Permodelan sistem *Perforated-Plate Fluidized Bed Coal Dryer* dengan *fluidized bed*



Gambar 3. 3 Permodelan sistem dengan *fluidized bed* pada Aspen Plus

4. Pengisian tingkat keadaan *stream* AIR-IN



Gambar 3. 4 Tingkat keadaan *stream* AIR-IN

5. Pengisian tingkat keadaan *stream* COAL-IN serta atribut dan ukuran partikel batubara



Gambar 3. 5 Tingkat keadaan *stream* COAL-IN

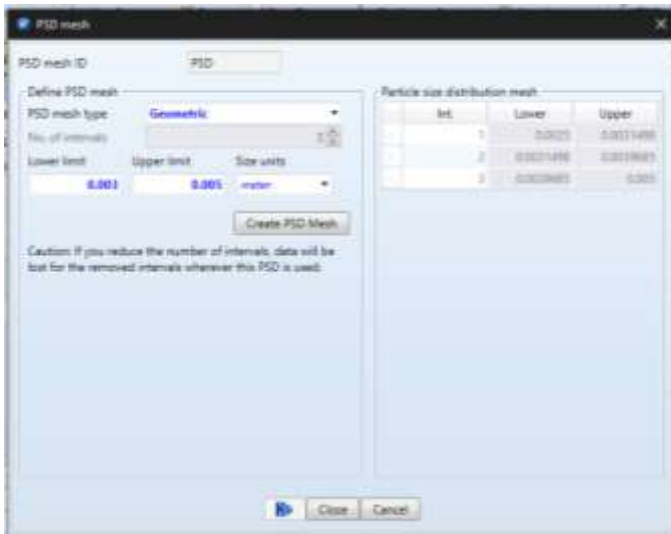
The three screenshots show the 'Component Attribute' window for the REAL COAL component. The first screenshot shows the 'Component Attribute' window with a table of attributes. The second screenshot shows the 'Component Attribute' window with a table of attributes. The third screenshot shows the 'Component Attribute' window with a table of attributes.

Attribute ID	Value
MOISTURE	4.94194
HC	45.1
VM	45.7
ADP	8.2

Attribute ID	Value
ASH	8.2
CARBON	87.1
HYDROGEN	4.8
NITROGEN	1.1
CHLORINE	0.1
SULFUR	1.2
OTHERS	16.0

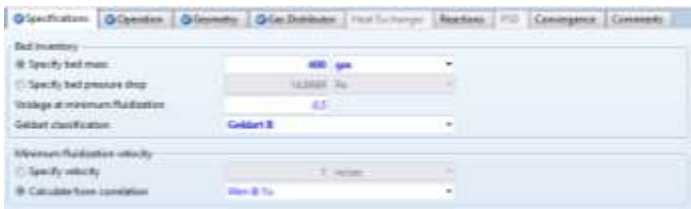
Attribute ID	Value
PPATIC	0.6
SILICE	0.1
ORGANIC	0.6

Gambar 3. 6 Atribut batubara

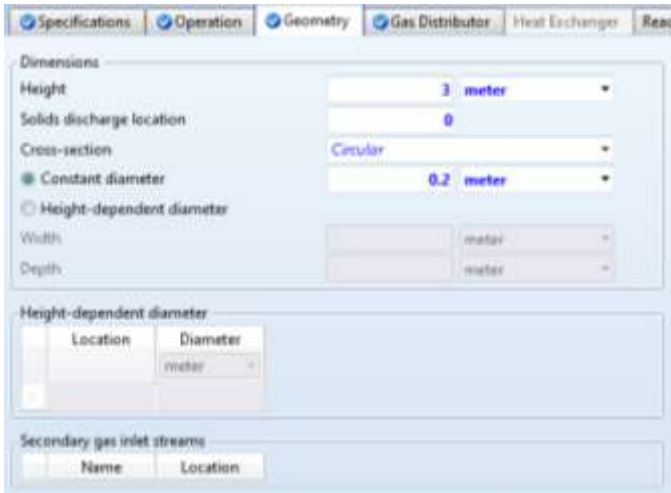


Gambar 3. 7 Particle size distribution batubara

6. Pengisian tingkat keadaan pada *dryer*



Gambar 3. 8 Tingkat keadaan *specification fluidized bed dryer*



Gambar 3. 9 Tingkat keadaan *geometry fluidized bed dryer*



Gambar 3. 10 tingkat keadaan *gas distributor fluidized bed dryer*

Adapun parameter yang ditetapkan untuk pelaksanaan simulasi ini antara lain tertera dalam tabel berikut:

Tabel 3. 1 Parameter tetap pada simulasi

PARAMETER OPERASI		NILAI	SATUAN
AIR-IN	Temperatur	50	°C
	Tekanan	1	atm
	<i>Relative Humidity (RH)</i>	20	%
COAL-IN	Temperatur	27	°C
	Tekanan	1	atm
	Massa	300	gram
	Waktu	15x1	menit

Selain tabel diatas, terdapat pula spesifikasi batubara sebagai parameter tetap dalam simulasi di Aspen Plus. Spesifikasi batubara tersebut dituangkan dalam tabel berikut:

Tabel 3. 2 *Proximate analysis* batubara

PROXIMATE ANALYSIS	
Moisture Content	40
Fixed Carbon	40.5
Volatile Matter	31.53
Ash Content	20.58

Tabel 3. 3 *Ultimate analysis* batubara

ULTIMATE ANALYSIS	
Ash	20.58
Carbon	73.16
Hydrogen	5.41
Nitrogen	1.35
Chlorine	0.033
Sulfur	0.51
Oxygen	9.14

Tabel 3. 4 *Sulfuric analysis* batubara

SULFURIC ANALYSIS	
Pyritic	0.05
Sulfate	0.01
Organic	0.45

7. Variasi pada simulasi *Perforated-Plate Fluidized Bed Coal Dryer* di Aspen Plus

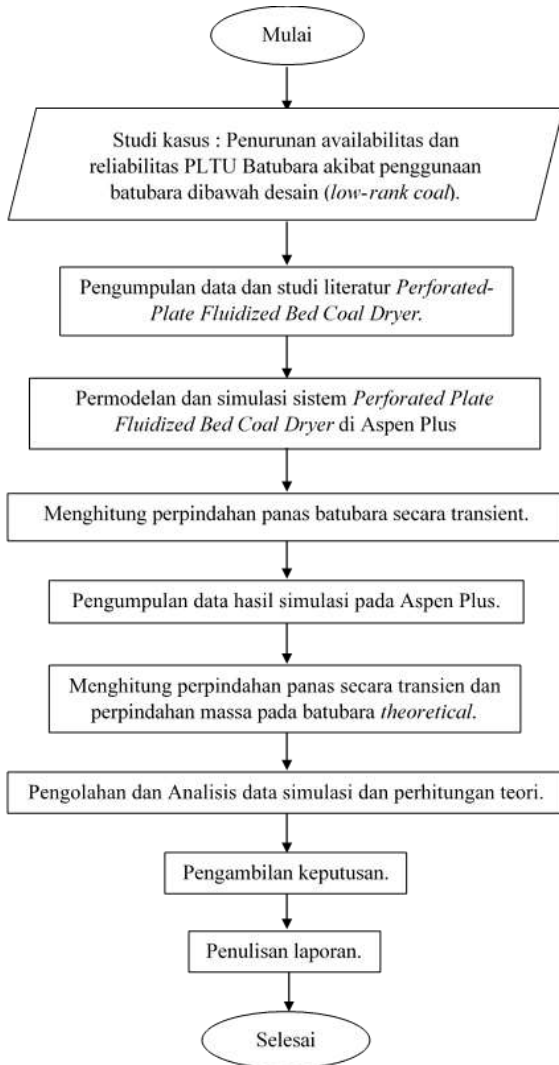
Tabel 3. 5 Variasi pada simulasi

PARAMETER OPERASI	NILAI	UNIT
Jenis Perforated Plate	A (dia 10mm @ 80pcs)	
	B (dia 5mm @ 325pcs)	
Kecepatan Udara Pengering	10, 11, 12, 13, 14	m/s
Menit Operasi	1 s/d 15	menit

8. *Running* simulasi

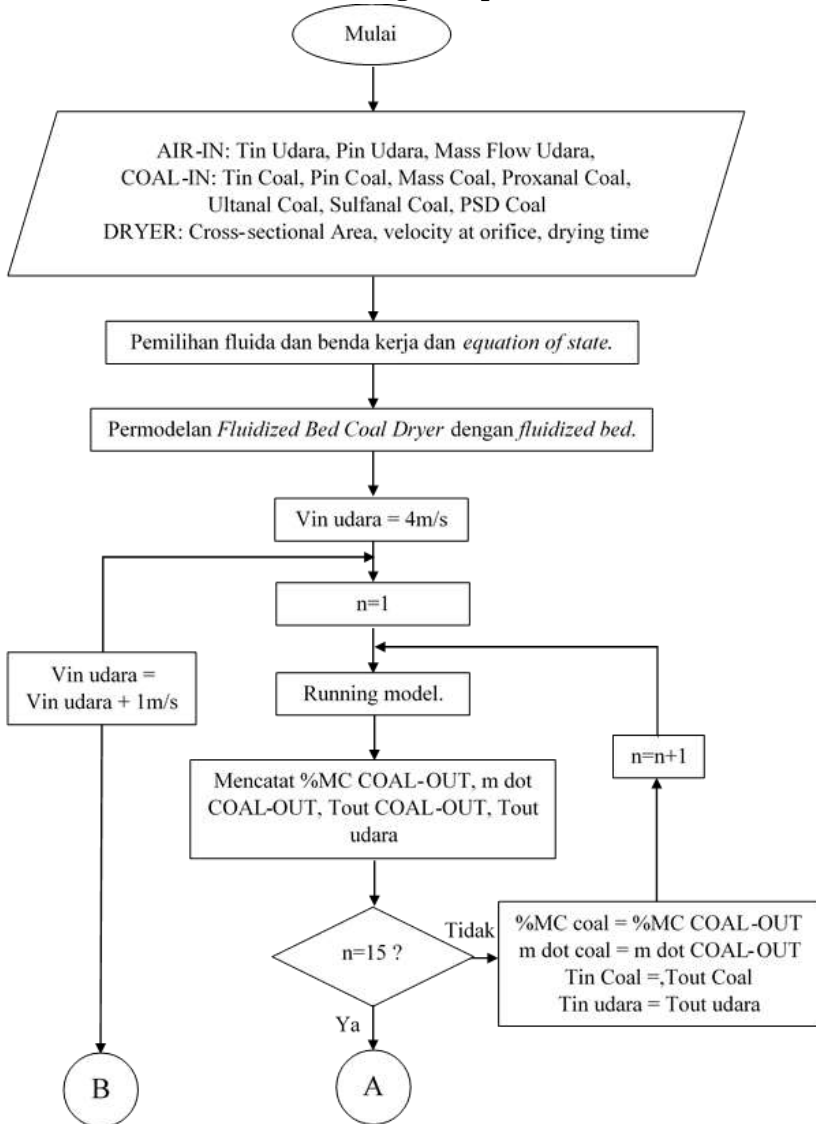
3.3 Flowchart Penelitian

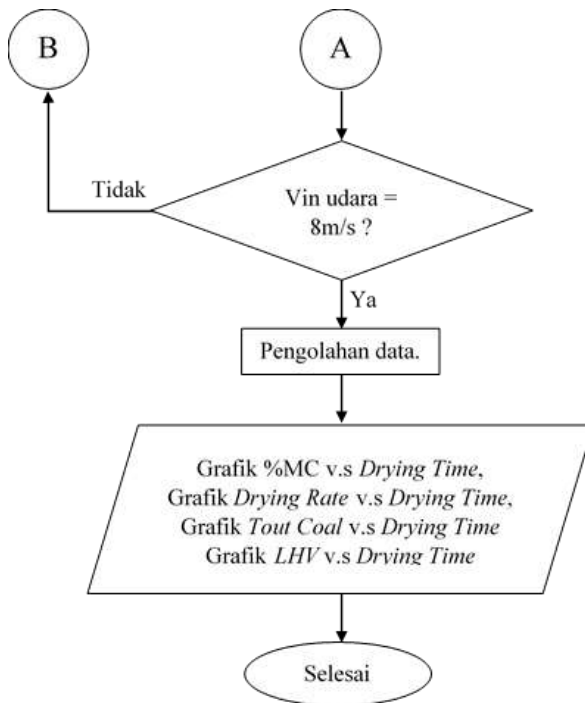
3.3.1 Flowchart Metode Penelitian



Gambar 3. 11 Flowchart metode penelitian

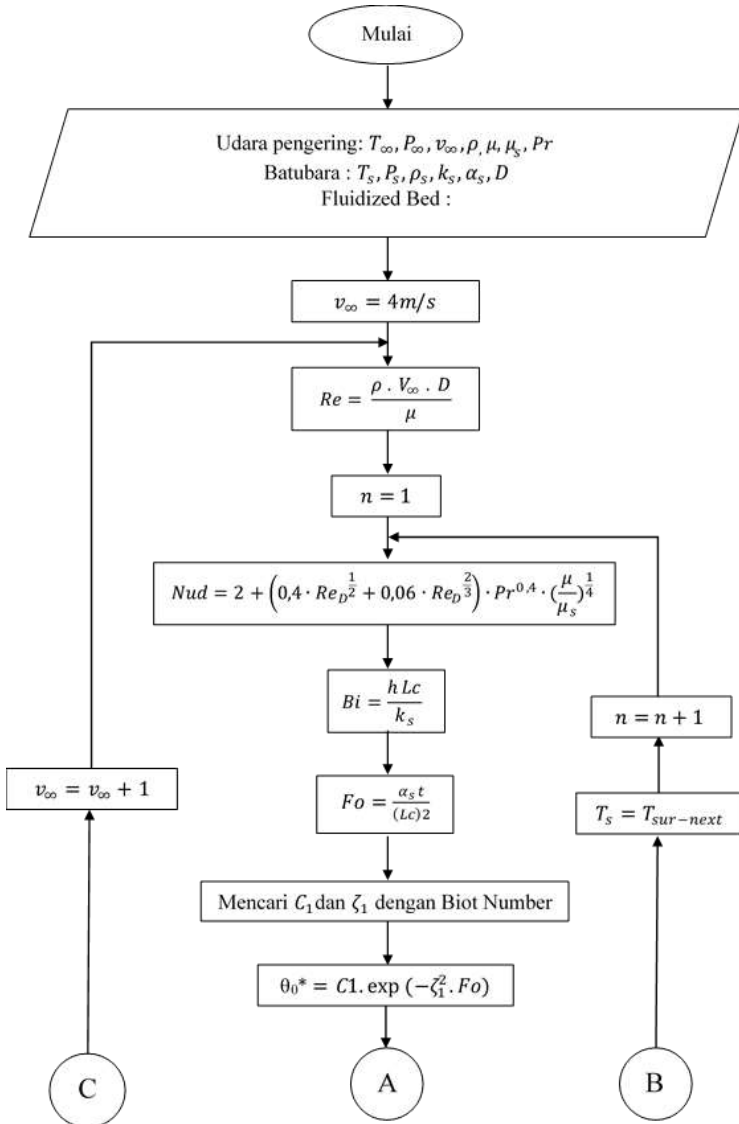
3.3.2 Flowchart Simulasi dengan Aspen Plus

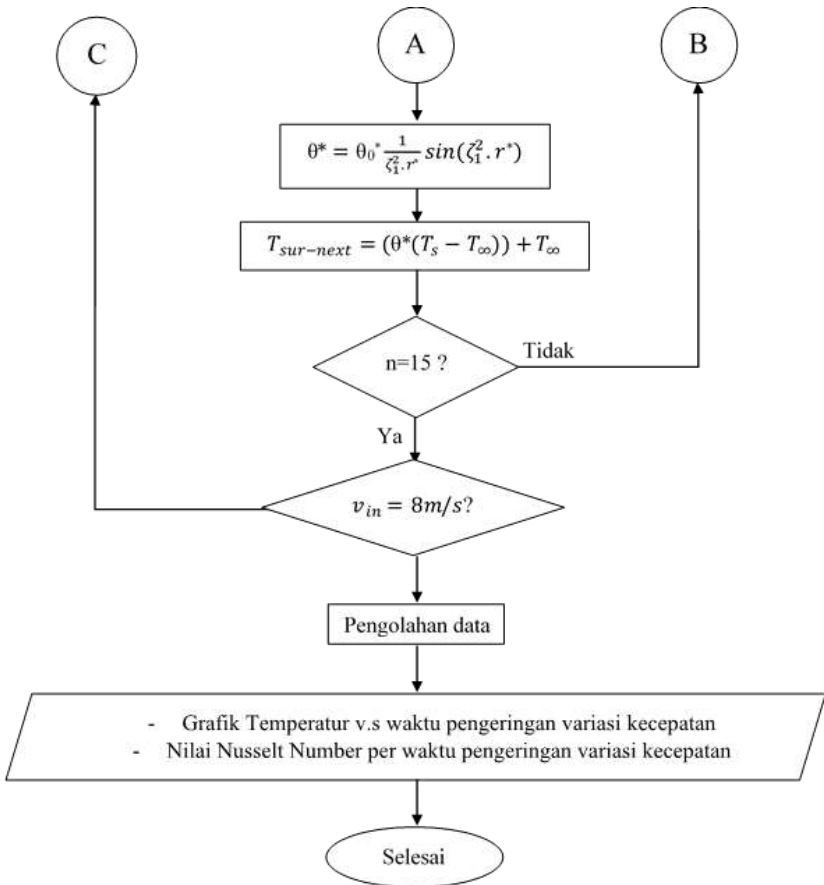




Gambar 3. 12 *Flowchart* simulasi dengan Aspen Plus

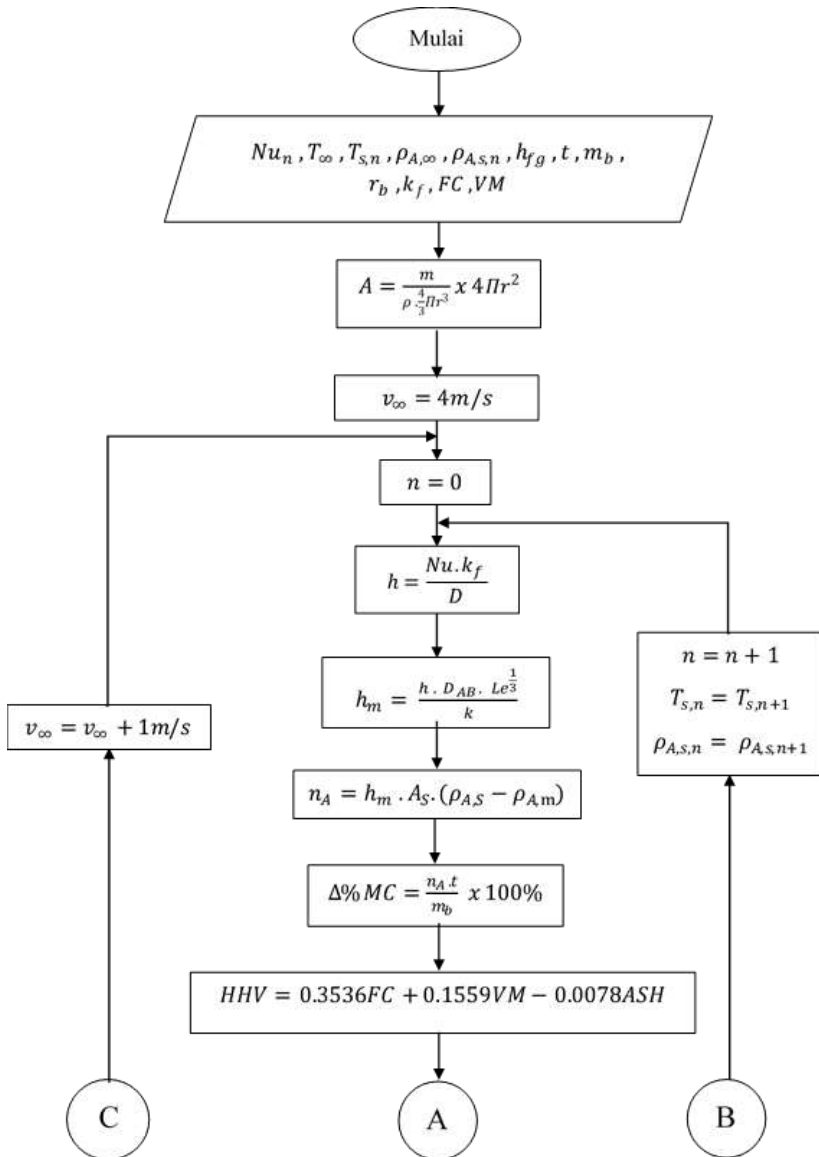
3.3.3 Flowchart Perhitungan Perpindahan Panas secara Transient

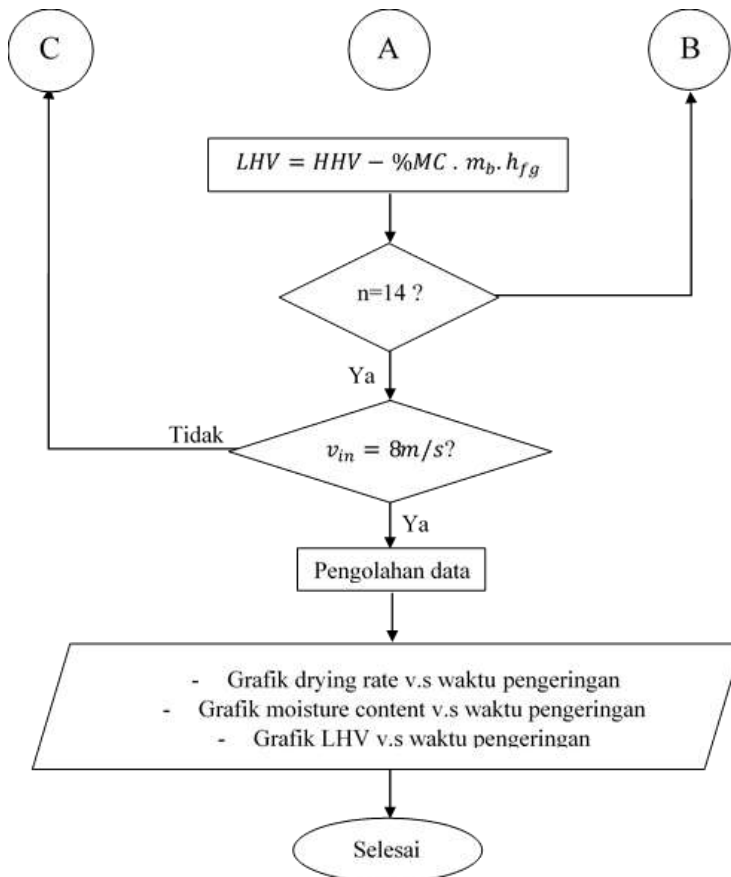




Gambar 3. 13 *Flowchart* perhitungan perpindahan panas secara *transient*

3.3.4 Flowchart Perhitungan Perpindahan Massa





Gambar 3. 14 Flowchart perhitungan perpindahan massa

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab Analisis data dan pembahasan akan dijelaskan mengenai hasil dari penelitian yang telah dilakukan yaitu performa *perforated plate fluidized bed dryer* dengan variasi perforated plate dan kecepatan udara pengering yang dinilai dari grafik *moisture content* v.s waktu, grafik *drying rate* v.s waktu, grafik temperatur batubara v.s waktu, dan grafik LHV v.s waktu dari hasil perhitungan teoritis dan simulasi dengan aplikasi Aspen Plus. Akan dilakukan validasi terhadap hasil penelitian dengan perbandingan terhadap jurnal atau penelitian terdahulu.

4.1 Data Hasil Simulasi dan Perhitungan

Data hasil simulasi pada Aspen Plus v10 dan perhitungan teoritis yang diperoleh beserta format perhitungan yang dilakukan pada Perforated Plate Fluidized Bed Coal Dryer dengan variasi kecepatan fluifikasi 14 m/s, 13 m/s, 12 m/s, 11 m/s dan 10 m/s pada Perforated Plate Type-A dan Perforated Plate Type-B terdapat pada lampiran.

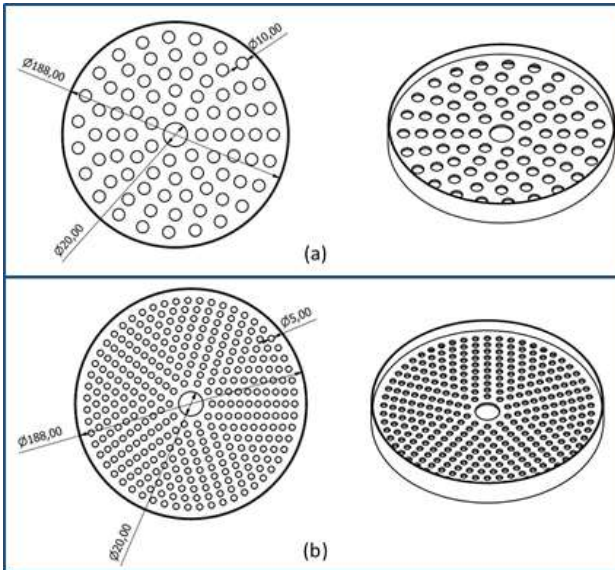
4.2 Analisis dan Contoh Perhitungan

4.2.1 Perhitungan Kecepatan Alir Udara Pengering pada Bed

Pada fluidized bed coal dryer, terdapat udara pengering yang mengalir melewati bed dan kemudian menuju batubara. Udara pengering tersebut memiliki kecepatan alir yang merupakan jauhnya jarak jangkauan udara per satuan waktu yang mengalir ke dalam drying chamber. Besarnya nilai kecepatan alir udara akan berbeda sebelum melewati bed dan ketika sedang melewati bed. Untuk mengetahui kecepatan alir udara ketika melewati bed pengering, perlu dihitung terlebih dahulu *open area* dari masing-masing *perforated plate bed*, serta luas penampang dryer. Perhitungan tersebut ditunjukkan sebagai berikut:

4.2.1.1 Open Area pada perforated plate Type-A dan Type-B

Bentuk perforated plate yang digunakan pada simulasi ditunjukkan pada gambar 4.1 dengan open area merupakan jumlah total luasan orifice yang terbuka dan dapat dilewati oleh udara pengering.



Gambar 4. 1 Dimensi perforated plate (a) Type-A, (b) Type-B

- Open Area perforated plate Type-A

Diameter orifice ($d_{orifice,A}$) = 10mm

Jumlah orifice ($N_{orifice,A}$) = 81

Open area ($A_{open,A}$)

$$A_{open,A} = \left[\frac{\pi}{4} d_{orifice,A}^2 \right] \cdot N_{orifice,A}$$

$$A_{open,A} = \left[\frac{\pi}{4} (10mm)^2 \right] \cdot 81$$

$$A_{open,A} = 6361,73mm^2$$

- Open Area perforated plate Type-B
 Diameter orifice ($d_{orifice,B}$) = 5mm
 Jumlah orifice ($N_{orifice,A}$) = 324
 Open area ($A_{open,B}$)

$$A_{open,B} = \left[\frac{\pi}{4} d_{orifice,B}^2 \right] \cdot N_{orifice,B}$$

$$A_{open,B} = \left[\frac{\pi}{4} (5mm)^2 \right] \cdot 324$$

$$A_{open,B} = 6361,73mm^2$$

4.2.1.2 Perhitungan Kecepatan Minimal Fluidisasi

- Volume 1 butir batubara
 Jari-jari batubara (r_{coal}) = 2mm
 Volume 1 butir batubara (V_{coal})

$$V_{coal} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$V_{coal} = \frac{4}{3} \pi (2 \times 10^{-3})^3 m^3 = 3,35 \times 10^{-8} m^3$$

- Luas permukaan 1 butir batubara
 Jari-jari batubara (r_{coal}) = 2mm
 Luas permukaan 1 butir batubara (A_{coal})

$$A_{coal} = 4\pi r^2$$

$$A_{coal} = 4\pi (2 \times 10^{-3})^2 m^2$$

$$A_{coal} = 5,03 \times 10^{-5} m^2$$

- Kecepatan minimum fluidisasi di *orifice*
 Massa jenis udara ($\rho_{\infty(T=50^\circ C)}$) = $1,085 \frac{kg}{m^3}$
 Massa jenis batubara (ρ_{coal}) = $1540 \frac{kg}{m^3}$

Coefficient of Drag bola (Cd_{bola}) = 0,35

Percepatan gravitasi (g) = 9,81 m/s^2

Kecepatan minimum fluidisasi di orifice ($V_{min,orifice}$)

$$V_{min,orifice} = \sqrt{\frac{2 \rho_{coal} \forall g}{Cd \rho_{\infty(T=50^{\circ}C)} A}}$$

$$= \sqrt{\frac{V_{min,orifice}}{2 \times 1540 \frac{kg}{m^3} \times (3,35 \times 10^{-8} m^3) \times 9,81 \frac{m}{s^2}}}{0,35 \times 1,085 \frac{kg}{m^3} \times (5,03 \times 10^{-5} m^2)}}$$

$$V_{min,orifice} = 7,08 \text{ m/s}$$

- Luas *cross-sectional chamber*
 Diameter chamber ($d_{chamber}$) = 200mm
 Luas *cross-sectional chamber* ($A_{chamber}$)

$$A_{chamber} = \pi \frac{d^2}{4}$$

$$A_{chamber} = \pi \frac{(200mm)^2}{4}$$

$$A_{chamber} = 31.415,92mm^2$$

- Kecepatan minimum fluidisasi di chamber
 Kecepatan minimum fluidisasi di orifice ($V_{min,orifice}$)
 = 7,08m/s
 Open area perforated plate Type-A dan Type-B ($A_{open,}$)
 = 6361,73mm²
 Luas *cross sectional chamber* ($A_{chamber}$)
 = 31.415,92mm²

Kecepatan minimum fluidisasi di chamber Type-A
($V_{min,chamber,A}$)

$$V_{min,chamber} = \frac{A_{open}}{A_{chamber}} V_{min,orifice}$$

$$V_{min,chamber} = \frac{6361,73mm^2}{31.415,92mm^2} 7,08m/s$$

$$V_{min,chamber} = 1,43m/s$$

- Luas *cross-sectional* selongsong
Diameter selongsong (d_s) = 85mm
Luas *cross-sectional* selongsong (A_s)

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

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

$$A_s = 5.674,50mm^2$$

- Kecepatan minimum fluidisasi di selongsong
Kecepatan minimum fluidisasi di orifice ($V_{min,orifice}$)
= 7,08m/s
Open area perforated plate Type-A dan Type-B (A_{open})
= 6.361,73mm²
Luas *cross sectional* selongsong (A_s)
= 5.674,50mm²
Kecepatan minimum fluidisasi di chamber Type-A
($V_{min,s,A}$)

$$V_{min,s} = \frac{A_{open}}{A_s} V_{min,orifice}$$

$$V_{min,s} = \frac{6.361,73mm^2}{5.674,50mm^2} 7,08m/s$$

$$V_{min,s,A} = 7,94m/s$$

4.2.2 Perhitungan Perpindahan Panas secara *Transient* pada Batubara

Pada simulasi *fluidized bed*, terdapat perpindahan panas secara transient yang terjadi antara udara pengering dan batubara akibat perbedaan temperatur. Berikut merupakan contoh perhitungan perpindahan panas yang terjadi secara transient untuk menit pertama pengeringan pada kecepatan udara pengering 6m/s dengan *perforated plate* Type-A.

4.2.2.1 Perhitungan Koefisien Konveksi

- Kecepatan udara pengering pada orifice Type-A
Kecepatan udara pengering pada selongsong (V_s) = 10m/s
Luas cross sectional selongsong (A_s) = 5.674,50mm²
Open area perforated plate Type-A ($A_{open,A}$)
= 6361,73mm²

Kecepatan udara pengering pada orifice Type-A ($V_{orifice,A}$)

$$V_{orifice,A} = \frac{A_s}{A_{orifice,A}} V_s$$

$$V_{orifice,A} = \frac{5.674,50mm^2}{6361,73mm^2} 10m/s$$

$$V_{orifice,A} = 8,92m/s$$

- Reynold Number
Massa jenis udara pengering ($\rho_{(T=50^\circ C)}$)
= 1,084856kg/m³
Kecepatan udara pengering pada orifice Type-A ($V_{orifice}$)
= 8,92m/s
Diameter batubara (D_{coal})
= 0,004m
Viskositas absolut udara pengering ($\mu_{(T=50^\circ C)}$)
= 1,95 x 10⁻⁵ N.s/m²

Reynold Number (Re_D)

$$Re_D = \frac{\rho_{(T=50^\circ C)} \cdot V_{orifice,A} \cdot D_{coal}}{\mu_{(T=50^\circ C)}}$$

$$Re_D = \frac{(1,084856 \frac{kg^3}{m}) \cdot (8,92 \frac{m}{s}) \cdot (0,004m)}{1,95 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2}$$

$$Re_D = 1.980,32$$

- Nusselt Number

Reynold Number (Re_D) = 1.980,32

Prandl Number ($Pr_{(T=50^\circ C)}$) = 0,70378

Viskositas absolut udara pengering ($\mu_{(T=50^\circ C)}$)

$$= 1,95 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2$$

Viskositas absolut udara pengering temperatur batubara (μ_s)

$$= 1,84 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2$$

Nusselt Number (Nu_D)

$$Nu_D = 2 + \left(0,4 \cdot Re_D^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re_D^{\frac{2}{3}} \right) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 2 + \left(0,4 \cdot (1.980,32)^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot (1.980,32)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (0,70378)^{0,4} \cdot \left(\frac{1,95 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2}{1,84 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 26,03$$

- Koefisien Konveksi

Nusselt Number (Nu_D) = 26,03

Koefisien konduksi perpindahan panas ($k_{f(T=50^\circ C)}$)

$$= 0,028 W/m \cdot K$$

Diameter batubara (D_{coal}) = 0,004m

Koefisien konveksi (h)

$$h = \frac{Nu_D \cdot k_{f(T=50^\circ C)}}{D_{coal}}$$

$$h = \frac{26,03 \cdot 0,028 \text{ W/m.K}}{0,004 \text{ m}}$$

$$h = 182,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.2.2.2 Perhitungan Temperatur Batubara Menit Selanjutnya

- Biot Number

Koefisien konveksi (h) = 182,22 W/m²K

Panjang karakteristik batubara (L_c) = $r_{coal} = 0,002 \text{ m}$

Konduktivitas termal batubara ($k_{coal(T=50^\circ\text{C})}$)

= 0,3407 W/m.K

Biot number (Bi)

$$Bi = \frac{h L_c}{k}$$

$$Bi = \frac{182,22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0,002 \text{ m}}{0,3407 \text{ W/m.K}}$$

$$Bi = 1,07$$

- Fourier Number

Thermal diffusivity partikel batubara ($\alpha_{coal(T=50^\circ\text{C})}$)

= $7,23 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

Waktu pengeringan (t) = 60 s

Panjang karakteristik batubara (L_c) = $r_{coal} = 0,002 \text{ m}$

Fourier number (Fo)

$$Fo = \frac{\alpha t}{(L_c)^2}$$

$$Fo = \frac{(7,23 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}) \cdot 60 \text{ s}}{(0,002 \text{ m})^2}$$

$$Fo = 0,2711$$

- Temperatur menit ke-1

$$\begin{aligned}
 \text{Fourier number } (Fo) &= 0,2711 \\
 \text{Temperatur udara } (T_{\infty}) &= 50^{\circ}\text{C} \\
 \text{Temperatur menit ke-0 } (T_{coal,0}) &= 27^{\circ}\text{C} \\
 C1_{(Bi=0,8305)} &= 1,6273 \\
 \zeta_{1(Bi=0,8305)} &= 1,3458 \\
 r^* &= 1 \\
 \theta_0^* &
 \end{aligned}$$

$$\theta_0^* = C1_{(Bi=0,8305)} \cdot \exp(-\zeta_{1(Bi=0,8305)}^2 \cdot Fo)$$

$$\theta_0^* = (1,6273) \cdot \exp(-(1,3458)^2 \cdot (0,2711))$$

$$\theta_0^* = 0,6565$$

$$\theta^*$$

$$\theta^* = \theta_0^* \frac{1}{\zeta_{1(Bi=0,8305)}^2 \cdot r^*} \sin(\zeta_{1(Bi=0,8305)}^2 \cdot r^*)$$

$$\theta^* = (0,7188) \frac{1}{(1,3458)^2 \cdot 1} \sin((1,3458)^2 \cdot 1)$$

$$\theta^* = 0,6564$$

$$\text{Temperatur menit ke-1 } (T_{coal,1})$$

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_{coal,1} - T_{\infty}}{T_{coal,0} - T_{\infty}}$$

$$T_{coal,1} = (\theta^*(T_{coal,0} - T_{\infty})) + T_{\infty}$$

$$T_{coal,1} = ((0,6564)(27^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C})) + 27^{\circ}\text{C}$$

$$T_{coal,1} = 34,90^{\circ}\text{C}$$

4.2.3 Perhitungan Perpindahan Massa pada Batubara

Pada simulasi *fluidized bed*, terdapat perpindahan massa air yang terjadi dari batubara menuju ke udara pengering sebagai

akibat dari proses pengeringan. Berikut merupakan contoh perhitungan perpindahan massa yang terjadi untuk menit pertama pengeringan pada kecepatan udara pengering 6m/s dengan *perforated plate Type-A*.

- *Lewis Number*

$$\text{Thermal diffusivity udara } (k) = 2,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Mass diffusivity air pada udara } (D_{AB}) = 3,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Lewis Number } (Le)$$

$$Le = \frac{k}{D_{AB}}$$

$$Le = \frac{2,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{3,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Le = 8,04 \times 10^{-2}$$

- Koefisien Perpindahan Massa

$$\text{Koefisien konveksi } (h) = 141,47 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Mass diffusivity air pada udara } (D_{AB}) = 3,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Lewis Number } (Le) = 8,04 \times 10^{-2}$$

$$\text{Thermal diffusivity udara } (k) = 2,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$h_m = \frac{h \cdot D_{AB} \cdot Le^{\frac{1}{3}}}{k}$$

$$h_m = \frac{141,47 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 3,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \cdot (8,04 \times 10^{-2})^{\frac{1}{3}}}{2,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$h_m = 6,56 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

- Luas permukaan total batubara

$$\text{Luas permukaan 1 butir batubara } (A_{coal}) = 5,03 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Massa jenis batubara } (\rho_{coal}) = 1650 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volume 1 butir batubara } (\forall_{\text{coal}}) = 3,35 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\text{Massa total batubara } (m_{\text{coal}}) = 0,3 \text{ kg}$$

$$\text{Luas permukaan total batubara } (A_{\text{tot,coal}})$$

$$A_{\text{tot,coal}} = A_{\text{coal}} \cdot \frac{m_{\text{coal}}}{\rho_{\text{coal}} \cdot \forall_{\text{coal}}}$$

$$A_{\text{tot,coal}} = 5,03 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \frac{0,3 \text{ kg}}{1650 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,35 \times 10^{-8} \text{ m}^3}$$

$$A_{\text{tot,coal}} = 2,92 \times 10^{-1} \text{ m}^2$$

- Drying Rate

$$\text{Koefisien perpindahan massa } (h_m)$$

$$= 6,56 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$\text{Luas permukaan total batubara } (A_{\text{tot,coal}})$$

$$= 2,92 \times 10^{-1} \text{ m}^2$$

$$\text{Massa jenis uap air jenuh pada batubara } (\rho_{A,s})$$

$$= 1,87 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Massa jenis uap air jenuh pada udara } (\rho_{A,\infty})$$

$$= 7,94 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Drying rate } (n_A)$$

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

$$n_A = \left(6,56 \times 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot \left(2,92 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \right) \left(\frac{1,87 \times 10^{-2} \text{ kg}}{\text{m}^3} - \frac{7,94 \times 10^{-3} \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$n_A = 1,92 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$n_A = 11,54 \text{ gr/min}$$

- Moisture Content Menit ke-1

$$\begin{aligned}
 & \text{Drying rate } (n_A) & & = \\
 11,54 \text{ gr/min} & & & \\
 & \text{Massa total batubara } (m_{coal}) & & = 300 \text{ gr} \\
 & \text{Moisture content menit ke-0 } (\%MC_0) & & = 34\% \\
 & \text{Waktu pengeringan } (t) & & = 60s \\
 & & & = 1 \text{ min} \\
 & \text{Moisture content menit ke-1 } (\%MC_1) & & \\
 & \%MC_1 = \%MC_0 - \left(\frac{n_A \cdot t}{m_{coal}} \cdot 100\% \right) & & \\
 \%MC_1 = 34\% - \left(\frac{11,54 \text{ gr/min} \cdot 1 \text{ min}}{300 \text{ gr}} \cdot 100\% \right) & & & \\
 & \%MC_1 = 30,15\% & &
 \end{aligned}$$

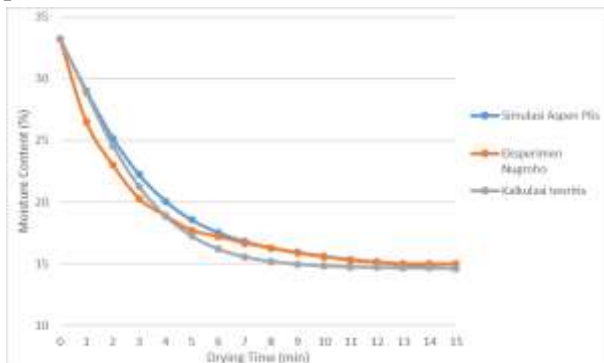
4.3 Validasi Hasil Simulasi dan Perhitungan

Sebagai perbandingan terhadap nilai yang didapat dari simulasi Aspen Plus dan perhitungan secara teoritis, dilakukan validasi dengan data yang didapatkan oleh Nugroho Hutomo Tri pada penelitiannya yang berjudul Studi Eksperimen Pengaruh Diameter Perforated Plate (5mm dan 10mm) dan Kecepatan Udara Dibawah Fluidisasi terhadap Kinerja Coal Dryer. Spesifikasi dan variable yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1

VARIABEL	NILAI	SATUAN
BED		
Tipe	Perforated Plate	
Jumlah Orifice	80	pcs
Diameter Orifice	10	mm
BATUBARA		
Massa	300	gram
Temperatur	27	°C
Moisture Content Awal	33,03	%
UDARA PENGERING		
Kecepatan Alir pada Selongsong	6	m/s
Diameter Selongsong	0.085	m
Volume Alir	0.034	m ³ /s
Temperatur	49,7	°C
Relative Humidity	15	%
Humidity Ratio	11,45	g/kg

Tabel 4. 1 Spesifikasi dan variabel eksperimen Nugroho Hutomo Tri

Dilakukan permodelan terhadap spesifikasi dan variabel eksperimen Nugroho Hutomo Tri. Parameter pertama yang diperbandingkan adalah moisture content batubara selama 15 menit pengeringan. Hasil perbandingan yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Perbandingan *moisture content* batubara dengan eksperimen Nugroho

Dalam chamber fluidized bed, terdapat proses pengeringan dimana terjadi perpindahan massa dari batubara ke udara pengering. Perpindahan massa ini menyebabkan moisture content batubara mengalami penurunan seiring berjalannya waktu pengeringan. Dalam perwujudannya, terdapat perbedaan antara eksperimen dan simulasi yang telah dilakukan, oleh karena itu, data dari ketiga pihak dikumpulkan. Setelah data perbandingan simulasi Aspen Plus, eksperimen Nugroho dan perhitungan teoritis dikumpulkan, dilakukan perhitungan *error* sebagai pembanding. Perhitungan *error* dilakukan untuk *moisture content* batubara per menit pengeringan antara simulasi Aspen Plus dan eksperimen Nugroho, serta perhitungan teoritis dan eksperimen Nugroho. Hasil perhitungan *error* diperlihatkan pada Gambar 4.4

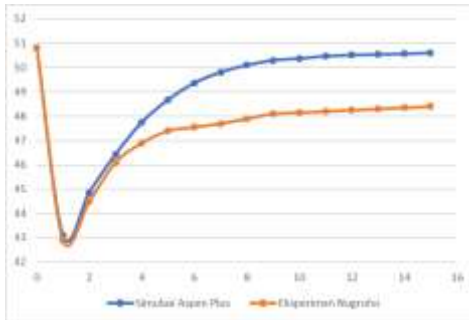
Tabel 4. 2 Perhitungan *error* pada moisture content batubara per menit pengeringan

t	MOISTURE CONTENT				
	EKSPERIMEN	SIMULASI		KALKULASI	
	Nilai	Nilai	Error	Nilai	Error
0	33.24%	33.24%	0.00%	33.24%	0.00%
1	26.48%	29.03%	9.64%	28.85%	5.52%
2	23.01%	25.19%	9.46%	24.57%	3.50%
3	20.29%	22.23%	9.58%	21.26%	2.11%
4	18.89%	20.07%	6.25%	18.85%	0.07%
5	17.71%	18.55%	4.72%	17.23%	1.03%
6	17.19%	17.52%	1.91%	16.19%	2.11%
7	16.67%	16.80%	0.75%	15.55%	2.36%
8	16.27%	16.29%	0.13%	15.19%	2.26%
9	15.86%	15.92%	0.37%	14.96%	1.87%
10	15.57%	15.60%	0.20%	14.83%	1.55%
11	15.28%	15.35%	0.47%	14.75%	1.11%
12	15.14%	15.14%	0.00%	14.70%	0.91%
13	14.99%	14.93%	0.38%	14.67%	0.66%
14	14.98%	14.75%	1.55%	14.65%	0.69%
15	14.98%	14.60%	2.53%	14.64%	0.70%

Error terbesar pada perbandingan antara simulasi Aspen Plus dan eksperimen Nugroho terdapat pada menit pengeringan ke-1 dengan angka error 9,64%. Sedangkan error terbesar pada

perbandingan antara perhitungan teoritis dengan eksperimen Nugroho terdapat pada menit pengeringan ke-1 dengan angka error 5,52%. Apabila diperhatikan, moisture content hasil simulasi Aspen Plus dan perhitungan teoritis menunjukkan nilai yang cenderung lebih rendah dari hasil eksperimen Nugroho. Hal ini dikarenakan keterbatasan penulis kepada nilai Proximate Analysis, Ultimate Analysis dan Sulfuric Analysis batubara selain moisture content batubara yang digunakan oleh Nugroho Hutomo Tri pada penelitiannya. Sehingga, dalam permodelan, penulis memakai data batubara yang dijadikan konstanta dalam simulasi. Selain itu, Nugroho Hutomo Tri mencantumkan pada naskah akademik penelitian pada bagian saran, untuk menggunakan alat ukur berat/timbangan yang menggunakan skala lebih kecil. Penggunaan timbangan dengan skala yang besar menyebabkan data moisture content dari batubara akan berbeda dari yang seharusnya.

Selanjutnya, parameter yang diperbandingkan adalah temperatur keluar dari udara pengering. Oleh karena keterbatasan persamaan, temperatur keluar udara pengering tidak dapat diketahui dengan perhitungan teoritis. Maka, hanya terdapat 2 data yang diperbandingkan yaitu hasil simulasi dengan Aspen Plus dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Nugroho. Hasil perbandingan temperatur keluar dari udara pengering dapat terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Perbandingan temperatur keluar udara pengering dengan eksperimen Nugroho

Seperti yang telah diketahui, terdapat perbedaan temperatur antara udara pengering yang masuk ke chamber dengan batubara yang menyebabkan terjadinya proses perpindahan panas. Proses perpindahan panas menyebabkan udara pengering mengalami penurunan temperatur. Seiring waktu, temperatur batubara akan mengalami kenaikan. Kenaikan temperatur batubara tidak dapat diperbandingkan karena ketidaksiadanya pada hasil eksperimen. Karena selisih temperatur batubara dan udara pengering yang semakin kecil, maka perpindahan panas yang terjadi juga semakin kecil. Sehingga, seiring waktu pengeringan, temperatur keluar udara pengering akan semakin tinggi dan mendekati temperatur masuk udara pengering. Terdapat perbedaan antara hasil yang didapatkan dari simulasi dan eksperimen. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan error sebagai perbandingan. Hasil perhitungan error ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Perhitungan error pada temperatur keluar udara pemanas setiap menit pengeringan

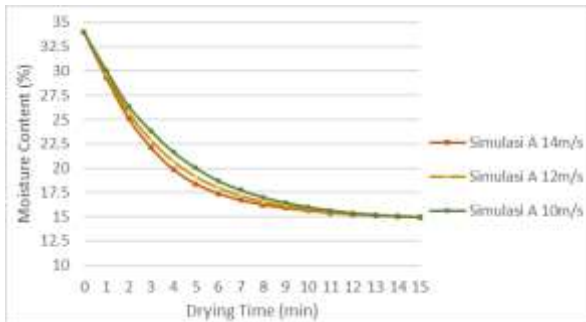
Menit	Temperatur KeluarUdara Pengerig		
	Eksperimen	Simulasi	
	Nilai (°C)	Nilai (°C)	Error(%)
0	50.8	50.8	0.00%
1	42.9	43.094614	0.45%
2	44.5	44.86294657	0.82%
3	46.1	46.4351093	0.73%
4	46.9	47.74857288	1.81%
5	47.4	48.67979721	2.70%
6	47.55	49.36616373	3.82%
7	47.7	49.81295392	4.43%
8	47.9	50.10419812	4.60%
9	48.1	50.29939749	4.57%
10	48.15	50.37824449	4.63%
11	48.2	50.47507773	4.72%
12	48.25	50.51990596	4.70%
13	48.3	50.54073405	4.64%
14	48.35	50.56908192	4.59%
15	48.4	50.60911662	4.56%

Error terbesar yang didapatkan antara simulasi dan eksperimen yang dilakukan oleh Al Velian Suci Hadi Widarwis adalah pada menit ke-5, ke-6 dan ke-7 pengeringan. Apabila diperhatikan, hasil simulasi menunjukkan temperatur keluar udara pengering yang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hal ini dikarenakan tidak adanya heat loss yang dikarenakan perpindahan panas dari dalam chamber ke lingkungan sekitar seperti yang terjadi pada eksperimen. Heat loss dapat terjadi pada eksperimen dikarenakan dinding chamber yang tipis agar perubahan pada batubara dapat teramati dengan lebih baik.

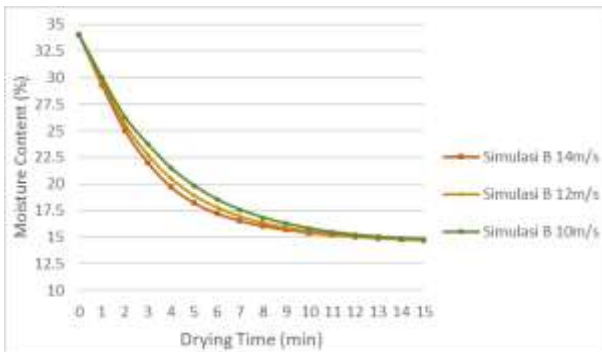
4.4 Analisis Performa Fluidized Bed Dryer Hasil Simulasi dan Perhitungan Teoritis

4.4.1 Analisis Grafik Moisture Content sebagai Fungsi Waktu Pengeringan

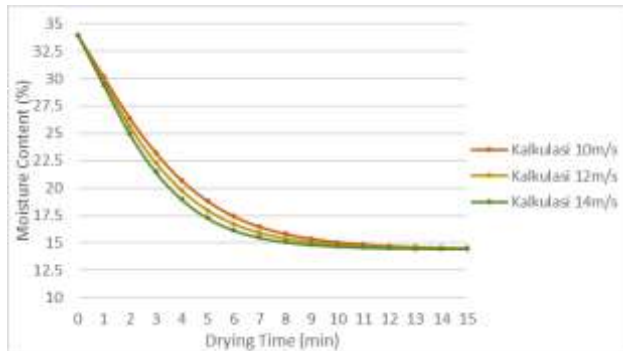
- Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pengering terhadap Moisture Content sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 4 Grafik simulasi *moisture content* batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 5 Grafik simulasi *moisture content* batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 6 Grafik perhitungan teoritis *moisture content* batubara dengan variasi kecepatan udara pengering

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap nilai *moisture content* pada batubara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik *moisture content* terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s untuk Perforated Plate Type-A ditunjukkan pada Gambar 4.4. Hasil simulasi pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s untuk Perforated Plate Type-B ditunjukkan pada Gambar 4.5. Hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada Gambar 4.6.

Dari seluruh grafik, diketahui bahwa *moisture content* batubara menunjukkan trendline yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan massa yang terjadi dari batubara ke udara pengering yang dinamakan proses pengeringan. Perpindahan massa dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan massa jenis air *saturated* pada udara pengering dan batubara. Proses pengeringan mengakibatkan berkurangnya kadar air pada batubara, sehingga *moisture content* batubara akan menurun. Apabila diperhatikan, penurunan *moisture content* pada menit ke-8 sampai menit ke-15 cenderung tidak signifikan apabila dibandingkan dengan pengeringan pada menit

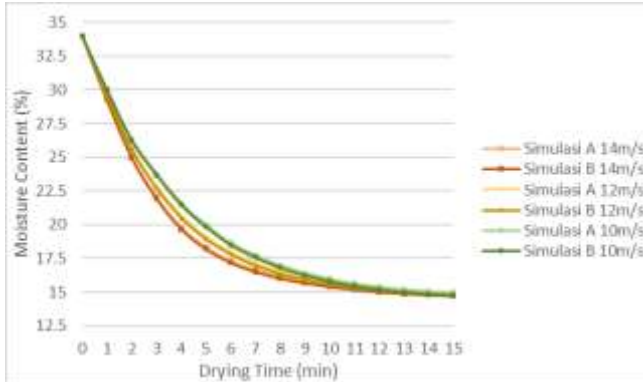
ke-1 sampai menit ke-7. Hal ini dapat terjadi karena penurunan kadar air pada batubara, sehingga menyebabkan massa jenis air saturated pada batubara mendekati udara pendingin, sehingga memiliki selisih yang semakin kecil. Oleh karena itu, drying rate juga akan menurun yang pada akhirnya menyebabkan penurunan *moisture content* yang semakin kecil.

Seperti yang telah diketahui, hasil pengeringan terbaik merupakan hasil pengeringan dengan batubara yang memiliki *moisture content* paling rendah. Pada perhitungan teoritis, pengeringan dengan *Perforated Plate Type-A* dan *Type-B* memiliki hasil yang sama, hal ini dikarenakan kecepatan udara pengering pada *orifice* kedua *perforated plate* memiliki nilai yang sama, sehingga memiliki nilai *reynolds number* yang sama pula. Nilai *reynolds number* yang sama menyebabkan nilai *nusselt number*, koefisien konveksi, dan koefisien perpindahan massa yang sama. Hasil simulasi pada *Perforated Plate Type-A* dan *Type-B* menunjukkan pengaruh kecepatan masuk udara pengering yang sama pada penurunan *moisture content* batubara, dimana selama 15 menit pengeringan, nilai *moisture content* paling rendah dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 14m/s dengan nilai *moisture content* simulasi sebesar 14,73% untuk *Perforated Plate Type-A* dan 14,71% untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah kedua dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 13m/s dengan nilai *moisture content* simulasi sebesar 14,79% untuk *Perforated Plate Type-A* dan 14,73% untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah ketiga dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 12m/s dengan nilai *moisture content* simulasi sebesar 14,99% untuk *Perforated Plate Type-A* dan 14,74% untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah keempat dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 11m/s dengan nilai *moisture content* simulasi sebesar 15,01% untuk *Perforated Plate Type-A* dan 14,76% untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai *moisture content* paling rendah kelima

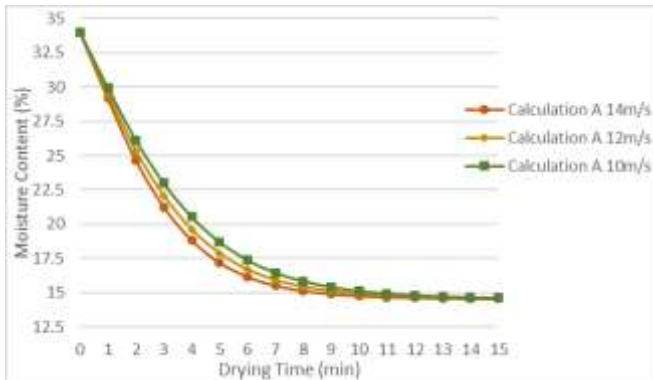
dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 10m/s dengan nilai moisture content simulasi sebesar 15,04% untuk Perforated Plate Type-A dan 14,79% untuk Perforated Plate Type-B. Hasil perhitungan teoritis pada kedua tipe perforated plate juga menunjukkan pengaruh kecepatan udara pengering pada nilai moisture content. Nilai moisture content paling rendah dicapai oleh kecepatan 14m/s sebesar 14,47%. Nilai moisture content paling rendah kedua dicapai oleh kecepatan 13m/s sebesar 14,48%. Nilai moisture content paling rendah ketiga dicapai oleh kecepatan 12m/s sebesar 14,49%. Nilai moisture content paling rendah keempat dicapai oleh kecepatan 11m/s sebesar 14,51%. Nilai moisture content paling rendah kelima dicapai oleh kecepatan 10m/s sebesar 14,54%.

Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap Perforated Plate Type-A dan Type-B, dapat disimpulkan bahwa kecepatan masuk udara pengering memiliki pengaruh terhadap penurunan *moisture content* pada batubara. Urutan penurunan *moisture content* selama 15 menit pengeringan dari yang paling baik hingga yang paling buruk adalah 14m/s, 13m/s, 12m/s, 11m/s dan 10m/s. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula Reynolds number. Semakin tinggi nilai Reynolds number menyebabkan nilai Nusselt number, koefisien konveksi, dan koefisien perpindahan massa yang semakin tinggi. Nilai koefisien konveksi dan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi menyebabkan kenaikan temperatur batubara dan penurunan moisture content yang lebih baik. Oleh karena itu dapat disimpulkan, bahwa kecepatan udara pengering berbanding lurus dengan kecepatan pengeringan batubara. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula kecepatan pengeringan batubara, begitu pula sebaliknya.

- Analisis Pengaruh Tipe *Perforated Plate* Pengering terhadap *Moisture Content* sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 7 Grafik simulasi *moisture content* batubara dengan variasi tipe *perforated plate* pada kecepatan 10m/s dan 14m/s



Gambar 4. 8 Grafik perhitungan teoritis *moisture content* batubara dengan variasi tipe *perforated plate* pada kecepatan 10m/s dan 14m/s

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh tipe *perforated plate* terhadap nilai *moisture content* pada batubara setiap menit

pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik *moisture content* terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 12m/s dan 14m/s dapat terlihat pada Gambar 4.7. Sedangkan, hasil perhitungan teoritis untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dapat terlihat pada Gambar 4.8.

Dari seluruh grafik, diketahui bahwa *moisture content* batubara menunjukkan trendline yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan massa yang terjadi dari batubara ke udara pengering yang dinamakan proses pengeringan. Perpindahan panas dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan massa jenis air *saturated* pada udara pengering dan batubara. Proses pengeringan mengakibatkan berkurangnya kadar air pada batubara, sehingga *moisture content* batubara akan menurun. Apabila diperhatikan, penurunan *moisture content* pada menit ke-8 sampai menit ke-15 cenderung tidak signifikan apabila dibandingkan dengan pengeringan pada menit ke-1 sampai menit ke-7. Hal ini dapat terjadi karena penurunan kadar air pada batubara, sehingga menyebabkan massa jenis air *saturated* pada batubara mendekati udara pendingin, sehingga memiliki selisih yang semakin kecil. Oleh karena itu, *drying rate* juga akan menurun yang pada akhirnya menyebabkan penurunan *moisture content* yang semakin kecil.

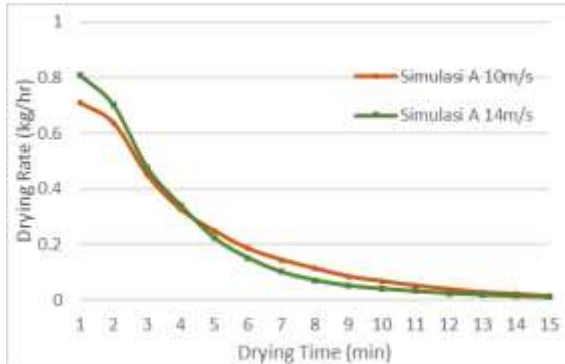
Seperti yang telah diketahui, hasil pengeringan terbaik merupakan hasil pengeringan dengan batubara yang memiliki *moisture content* paling rendah. Hasil simulasi pada kecepatan udara pengering 10m/s, 11m/s, 12m/s, 13m/s dan 14m/s menunjukkan pengaruh tipe *perforated plate* yang sama pada penurunan *moisture content* batubara, dimana selama 7 menit pengeringan, nilai *moisture content* paling rendah dicapai oleh variasi *Perforated Plate Type-B* dengan nilai *moisture content* simulasi sebesar 14,71% untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 14,73% untuk kecepatan masuk udara pengering 11m/s, 14,99% untuk kecepatan masuk udara pengering 12m/s, 14,76%

untuk kecepatan masuk udara pengering 13m/s, 14,79% untuk kecepatan masuk udara pengering 14m/s. Setelah itu, diikuti oleh variasi *Perforated Plate Type-A* dengan nilai *moisture content* simulasi sebesar 14,73% untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 14,79% untuk kecepatan masuk udara pengering 11m/s, 14,99% untuk kecepatan masuk udara pengering 12m/s, 15,01% untuk kecepatan masuk udara pengering 13m/s, 15,04% untuk kecepatan masuk udara pengering 14m/s.

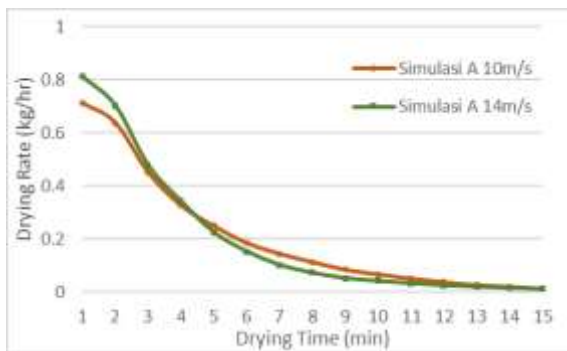
Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 11m/s, 12m/s, 13m/s dan 14m/s, dapat disimpulkan bahwa tipe *perforated plate* memiliki pengaruh yang tidak signifikan terhadap penurunan *moisture content* pada batubara. Akan tetapi, *Perforated Plate Type-B* menunjukkan penurunan kadar *moisture content* yang sedikit lebih baik dibandingkan *Perforated Plate Type-A*. Hal ini dikarenakan orifice *Perforated Plate Type-B* yang tersebar lebih merata daripada *Perforated Plate Type-A*. Akan tetapi, pengaruh persebaran orifice tidak dapat diakomodasi oleh perhitungan teoritis, karena keterbatasan persamaan yang tersedia. Perhitungan teoritis akan tetap menyatakan penurunan *moisture content* yang sama diakibatkan luas open-area kedua *perforated plate* yang sama.

4.4.2 Analisis Drying Rate Batubara Fungsi Waktu

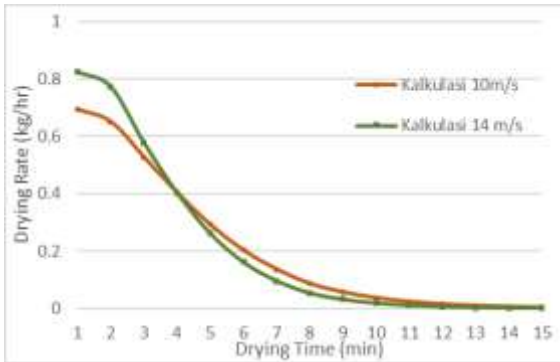
- Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pengering terhadap Drying Rate Batubara sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 9 Grafik simulasi drying rate batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 10 Grafik simulasi drying rate batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 11 Grafik perhitungan teoritis drying rate batubara dengan variasi kecepatan udara pengering

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap temperatur batubara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik drying rate dalam satuan kg/jam terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-A ditunjukkan pada Gambar 4.9. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-B ditunjukkan pada Gambar 4.10. Hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada Gambar 1.11

Dari seluruh grafik, diketahui bahwa drying rate menunjukkan trendline yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini menggambarkan penjelasan sebelumnya dimana penurunan moisture content semakin sedikit seiring berjalannya waktu pengeringan.

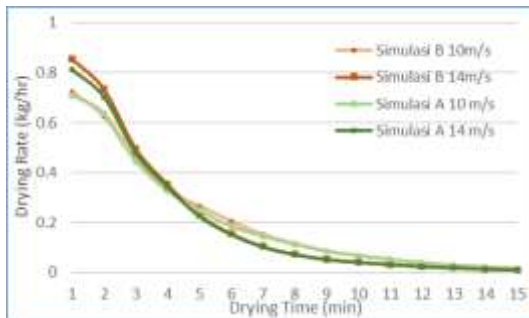
Seperti yang telah diketahui, hasil pemanasan terbaik merupakan hasil pemanasan dengan drying rate yang lebih tinggi. Apabila diperhatikan, kecepatan udara pengering yang lebih tinggi memiliki drying rate di menit ke-1 hingga ke-4 pengeringan yang lebih tinggi. Akan tetapi, seiring berjalannya waktu, dring rate dari kecepatan udara pengering yang lebih tinggi pada menit ke-4 hingga ke-15 pengeringan memiliki nilai yang lebih rendah.

Seperti yang kita ketahui, nilai drying rate tidak hanya dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa, melainkan juga perbedaan massa jenis air saturated antara batubara dan udara pengering. Sementara itu, perbedaan nilai moisture content akan turun lebih drastis pada kecepatan udara pengering yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan perbedaan massa jenis air saturated antara batubara dan udara pengering lebih kecil. Hal inilah yang menyebabkan nilai drying rate pada kecepatan udara pengering yang lebih tinggi akan menurun lebih cepat daripada kecepatan udara pengering yang lebih rendah, walaupun drying rate pada kecepatan udara yang lebih tinggi akan memiliki nilai yang lebih besar pada awal pengeringan, dikarenakan perbedaan massa jenis air saturated antara batubara dan udara pengering yang sama diawal pengeringan. Oleh karena itu, sebagai pembanding, dipergunakan drying rate pada menit ke-1 pengeringan. Diketahui, pada menit ke-1, drying rate terbaik dimiliki oleh kecepatan udara pengering 14m/s dengan nilai 14,15 gr/min pada Perforated Plate Type-A dan 14,24 gr/min pada Perforated Plate Type-B. Setelah itu, drying rate kedua terbaik dimiliki oleh kecepatan udara pengering 13m/s dengan nilai 13,45 gr/min pada Perforated Plate Type-A dan 13,71 gr/min pada Perforated Plate Type-B. Setelah itu, drying rate ketiga terbaik dimiliki oleh kecepatan udara pengering 12m/s dengan nilai 12,96 gr/min pada Perforated Plate Type-A dan 13,20 gr/min pada Perforated Plate Type-B. Setelah itu, drying rate keempat terbaik dimiliki oleh kecepatan udara pengering 11m/s dengan nilai 12,42 gr/min pada Perforated Plate Type-A dan 12,62 gr/min pada Perforated Plate Type-B. Setelah itu, drying rate kelima terbaik dimiliki oleh kecepatan udara pengering 10m/s dengan nilai 11,87 gr/min pada Perforated Plate Type-A dan 12,04 gr/min pada Perforated Plate Type-B.

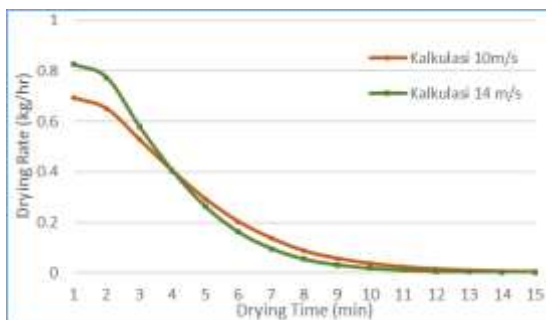
Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap Perforated Plate Type-A dan Type-B, dapat disimpulkan bahwa kecepatan masuk udara pengering memiliki pengaruh terhadap drying rate batubara selama 15 menit pengeringan. Urutan drying rate terbaik

pada menit pertama pengeringan dari yang paling baik hingga yang paling buruk adalah 14m/s, 13m/s, 12m/s, 11m/s dan 10m/s. Oleh karena itu dapat disimpulkan, bahwa kecepatan udara pengering berbanding lurus dengan drying rate batubara. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula drying rate batubara pada menit pertama pengeringan, begitu pula sebaliknya.

- Analisis Pengaruh Tipe *Perforated Plate* terhadap *Drying Rate* Batubara sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 12 Grafik simulasi *drying rate* batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe *perforated plate*



Gambar 4. 13 Grafik perhitungan teoritis *drying rate* batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe *perforated plate*

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh tipe *perforated plate* terhadap nilai *drying rate* pada batubara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik *drying rate* terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dapat terlihat pada Gambar 4.12. Sedangkan, hasil perhitungan teoritis untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dapat terlihat pada Gambar 4.13.

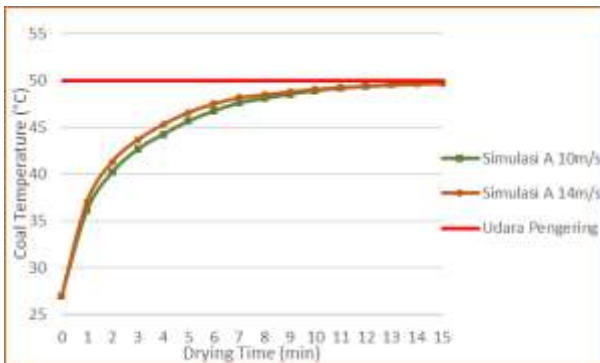
Dari seluruh grafik, diketahui bahwa *drying rate* menunjukkan trendline yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini menggambarkan penjelasan sebelumnya dimana penurunan moisture content semakin sedikit seiring berjalannya waktu pengeringan.

Seperti yang telah diketahui, hasil pengeringan terbaik merupakan hasil pengeringan dengan *drying rate* menit pertama paling tinggi sebagai representasi. Hasil simulasi pada kecepatan udara pengering 10m/s, 11m/s, 12m/s, 13m/s dan 14m/s menunjukkan pengaruh tipe *perforated plate* yang sama pada penurunan *drying rate* batubara, dimana selama 7 menit pengeringan, nilai *drying* paling tinggi dicapai oleh variasi *Perforated Plate Type-B* dengan nilai *drying rate* simulasi sebesar 14,24 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 13,71 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 11m/s, 13,20 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 12m/s, 12,62 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 13m/s, 12,04 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 14m/s. Setelah itu, diikuti oleh variasi *Perforated Plate Type-A* dengan nilai *drying* simulasi sebesar 14,15 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 13,45 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 11m/s, 12,96 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 12m/s, 12,42 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 13m/s, 11,87 gr/min untuk kecepatan masuk udara pengering 14m/s.

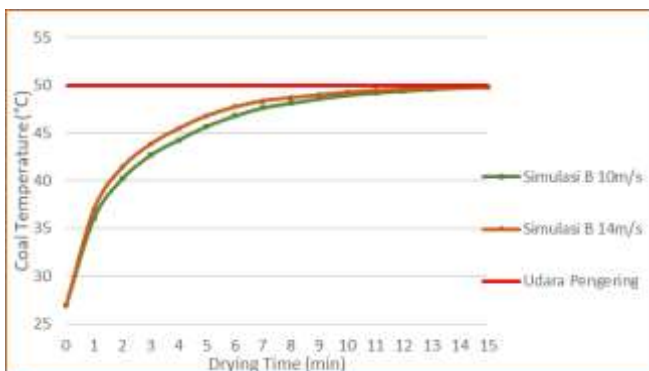
Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 11m/s, 12m/s, 13m/s dan 14m/s, dapat disimpulkan bahwa tipe *perforated plate* memiliki pengaruh yang tidak signifikan terhadap nilai *drying rate* menit pertama pada batubara. Akan tetapi, Perforated Plate Type-B menunjukkan nilai *drying rate* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan Perforated Plate Type-A. Hal ini dikarenakan orifice Perforated Plate Type-B yang tersebar lebih merata daripada Perforated Plate Type-B. Akan tetapi, pengaruh persebaran orifice tidak dapat diakomodasi oleh perhitungan teoritis, karena keterbatasan persamaan yang tersedia. Perhitungan teoritis akan tetap menyatakan penurunan moisture content yang sama diakibatkan luas *open-area* kedua *perforated plate* yang sama.

4.4.3 Analisis Temperatur Batubara Fungsi Waktu

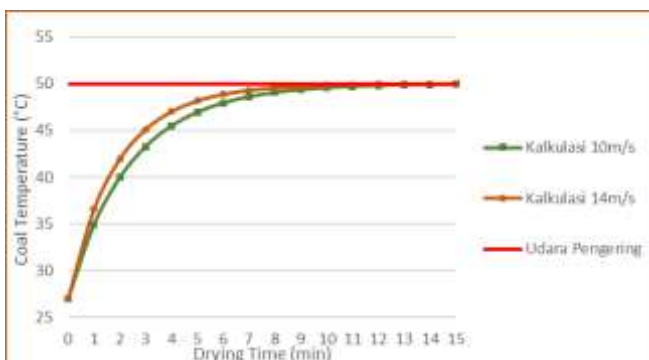
- Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pengering terhadap Temperatur Batubara sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 14 Grafik simulasi temperatur batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 15 Grafik simulasi temperatur batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 16 Grafik perhitungan teoritis temperatur batubara dengan variasi kecepatan udara pengering

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap temperatur batubara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik moisture content terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-A ditunjukkan pada Gambar 4.14. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-B

ditunjukkan pada Gambar 4.15. Hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada Gambar 4.16.

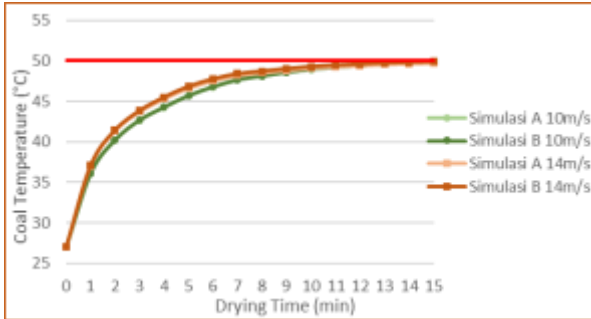
Dari seluruh grafik, diketahui bahwa temperatur batubara menunjukkan trendline yang naik seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan panas yang terjadi dari udara pengering ke batubara yang dinamakan proses pemanasan/*sensible heating*. Perhitungan teoritis terhadap temperatur batubara dilakukan dengan metode *transient*, sehingga dapat diketahui perubahannya terhadap waktu. Apabila diperhatikan, kenaikan temperatur batubara pada menit ke-8 hingga ke-15 pengeringan lebih landai dibandingkan dengan pada menit ke-1 hingga ke-7. Hal ini dikarenakan selisih temperatur batubara dengan udara pengering yang semakin kecil, sehingga menyebabkan perpindahan panas yang terjadi juga mengalami penurunan.

Seperti yang telah diketahui, hasil pemanasan terbaik merupakan hasil pemanasan dengan peningkatan temperatur batubara yang lebih baik. Hasil simulasi dan perhitungan teoritis pada kedua tipe *perforated plate* menunjukkan perbedaan temperatur batubara paling signifikan pada menit pengeringan ke-6. Oleh karena itu, temperatur batubara pada menit ke-6 dijadikan acuan untuk melihat pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap temperatur batubara. Pengeringan terbaik dicapai oleh kecepatan 14m/s dimana temperatur batubara pada menit ke-6 pengeringan secara simulasi bernilai 45,43°C untuk Perforated Plate Type-A dan 45,46°C untuk Perforated Plate Type-B, sementara secara perhitungan teoritis bernilai 48,89°C. Pengeringan terbaik kedua dicapai oleh kecepatan 13m/s dimana temperatur batubara pada menit ke-6 pengeringan secara simulasi bernilai 45,22°C untuk Perforated Plate Type-A dan 45,30°C untuk Perforated Plate Type-B, sementara secara perhitungan teoritis bernilai 48,71°C. Pengeringan terbaik ketiga dicapai oleh kecepatan 12m/s dimana temperatur batubara pada menit ke-6 pengeringan secara simulasi bernilai 45,03°C untuk Perforated

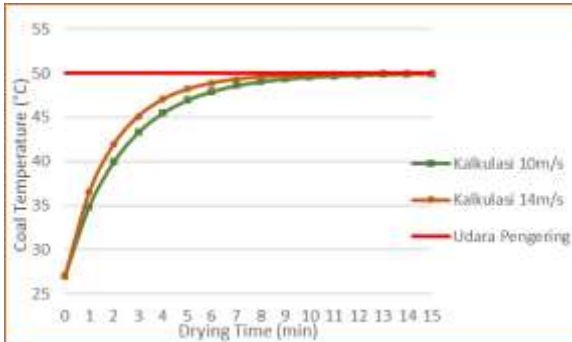
Plate Type-A dan $45,10^{\circ}\text{C}$ untuk Perforated Plate Type-B, sementara secara perhitungan teoritis bernilai $48,43^{\circ}\text{C}$. Pengeringan terbaik keempat dicapai oleh kecepatan 11m/s dimana temperatur batubara pada menit ke-6 pengeringan secara simulasi bernilai $44,79^{\circ}\text{C}$ untuk Perforated Plate Type-A dan $44,85^{\circ}\text{C}$ untuk Perforated Plate Type-B, sementara secara perhitungan teoritis bernilai $48,23^{\circ}\text{C}$. Pengeringan terbaik kelima dicapai oleh kecepatan 10m/s dimana temperatur batubara pada menit ke-6 pengeringan secara simulasi bernilai $44,52^{\circ}\text{C}$ untuk Perforated Plate Type-A dan $44,57^{\circ}\text{C}$ untuk Perforated Plate Type-B, sementara secara perhitungan teoritis bernilai $47,93^{\circ}\text{C}$.

Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap Perforated Plate Type-A dan Type-B, dapat disimpulkan bahwa kecepatan masuk udara pengering memiliki pengaruh terhadap kenaikan temperatur batubara selama 15 menit pengeringan. Urutan kenaikan temperatur paling signifikan selama 15 menit pengeringan dari yang paling baik hingga yang paling buruk adalah 14m/s , 13m/s , 12m/s , 11m/s dan 10m/s . Oleh karena itu dapat disimpulkan, bahwa kecepatan udara pengering berbanding lurus dengan kecepatan pemanasan batubara. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula kecepatan pemanasan batubara, begitu pula sebaliknya.

- Analisis Pengaruh Tipe Perforated Plate terhadap Temperatur Batubara sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 17 Grafik simulasi temperatur batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe *perforated plate*



Gambar 4. 18 Grafik simulasi temperatur batubara pada kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dengan variasi tipe *perforated plate*

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh tipe perforated plate terhadap nilai *moisture content* pada batubara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan

dalam bentuk grafik *moisture content* terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi untuk kecepatan masuk udara pengering 10m/s dan 14m/s dapat terlihat pada Gambar 4.17. Sedangkan, hasil perhitungan teoritis untuk kecepatan masuk udara pengering 10 dan 14 m/s dapat terlihat pada Gambar 4.18.

Dari seluruh grafik, diketahui bahwa temperatur batubara menunjukkan *trendline* yang naik seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan panas yang terjadi dari udara pengering ke batubara yang dinamakan proses pemanasan/*sensible heating*. Apabila diperhatikan, kenaikan temperatur batubara pada menit ke-8 sampai menit ke-15 cenderung tidak signifikan apabila dibandingkan dengan pada menit ke-1 sampai menit ke-7. Hal ini dikarenakan selisih temperatur batubara dengan udara pengering yang semakin kecil, sehingga menyebabkan perpindahan panas yang terjadi juga semakin sedikit.

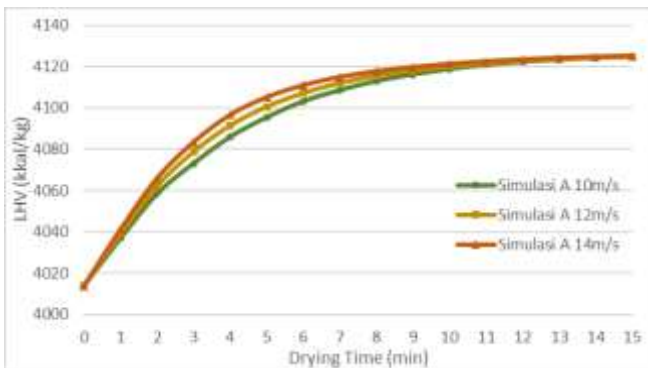
Seperti yang telah diketahui, hasil pemanasan terbaik merupakan hasil pemanasan dengan peningkatan temperatur batubara yang lebih baik. Hasil simulasi dan perhitungan teoritis pada kedua tipe *perforated plate* menunjukkan perbedaan temperatur batubara paling signifikan pada menit pengeringan ke-6. Oleh karena itu, temperatur batubara pada menit ke-6 dijadikan acuan untuk melihat pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap temperatur batubara. Pengeringan terbaik dicapai oleh Perforated Plate Type-B dimana temperatur batubara pada menit ke-6 pengeringan secara simulasi pada kecepatan masuk udara pengering 14m/s, 13m/s, 12m/s, 11m/s dan 10m/s bernilai 45,46°C, 45,30°C, 45,10°C, 44,85°C dan 44,57°C. Pengeringan terbaik kedua dicapai oleh Perforated Plate Type-A dimana temperatur batubara pada menit ke-6 pengeringan secara simulasi pada kecepatan masuk udara pengering 7m/s, 5m/s dan 3m/s bernilai 45,43°C, 45,22°C, 45,03°C, 44,79°C dan 44,52°C. Tidak terdapat perbedaan temperatur antara Perforated Plate Type-A dan Type-B secara perhitungan teoritis. Nilai temperatur batubara pada menit

ke-6 pengeringan secara perhitungan teoritis pada kecepatan masuk udara pengering 14m/s, 13m/s, 12m/s, 11m/s dan 10m/s bernilai 48,89°C, 48,71°C, 48,43°C, 48,23°C dan 47,93°C.

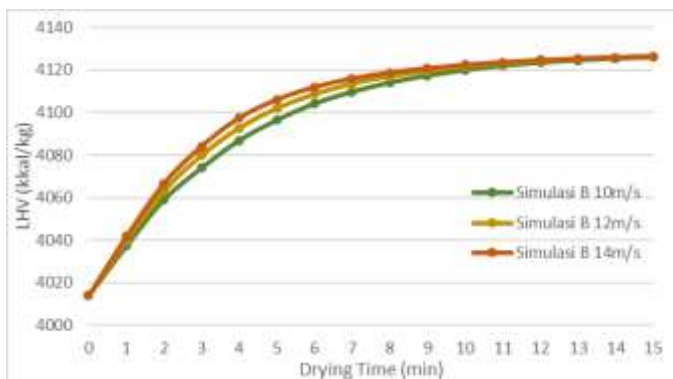
Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap kecepatan masuk udara pengering 10m/s, 11m/s, 12m/s, 13m/s dan 14m/s, dapat disimpulkan bahwa tipe *perforated plate* memiliki pengaruh yang tidak signifikan terhadap nilai temperatur batubara menit ke-6 pengeringan. Akan tetapi, Perforated Plate Type-B menunjukkan nilai temperatur batubara yang sedikit lebih tinggi dibandingkan Perforated Plate Type-A. Hal ini dikarenakan orifice Perforated Plate Type-B yang tersebar lebih merata daripada Perforated Plate Type-B. Akan tetapi, pengaruh persebaran orifice tidak dapat diakomodasi oleh perhitungan teoritis, karena keterbatasan persamaan yang tersedia. Perhitungan teoritis akan tetap menyatakan kenaikan temperatur batubara yang sama diakibatkan luas *open-area* kedua *perforated plate* yang sama.

4.4.4 Analisis Grafik LHV sebagai Fungsi Waktu Pengeringan

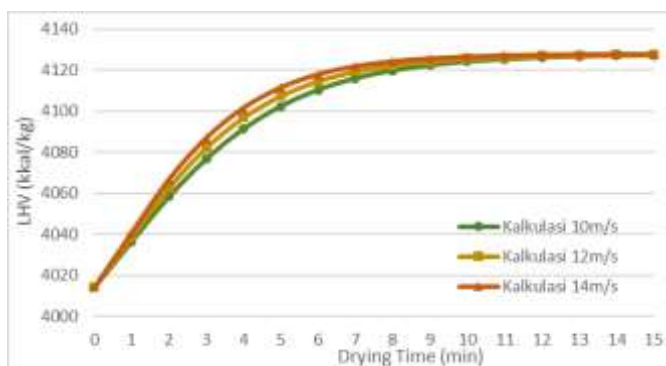
- Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pengering terhadap LHV Batubara sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 19 Grafik simulasi LHV batubara pada Perforated Plate Type-A dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 20 Grafik simulasi LHV batubara pada Perforated Plate Type-B dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 21 Grafik perhitungan teoritis LHV batubara dengan variasi kecepatan udara pengering

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap nilai LHV pada batubara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat, dilakukan kalkulasi, untuk kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik LHV terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s untuk Perforated Plate Type-A ditunjukkan pada

Gambar 4.19. Hasil simulasi pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s untuk Perforated Plate Type-B ditunjukkan pada Gambar 4.20. Hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada Gambar 4.21.

Dari seluruh grafik, diketahui bahwa LHV batubara menunjukkan trendline yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Kenaikan nilai LHV sesuai dengan penurunan moisture content yang terjadi. Meskipun nilai HHV tidak dipengaruhi oleh penurunan moisture content karena HHV tidak memperhitungkan penguapan air yang terkandung pada bahan bakar. Seperti yang telah diketahui, nilai HHV dapat diketahui dengan persamaan $HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078ASH$. Kemudian nilai LHV dapat diketahui dengan persamaan $LHV = HHV - \%MC \cdot m_b \cdot h_{fg}$. Karena nilai HHV yang sama, serta nilai moisture content awal yang sama, maka LHV batubara sebelum dikeringkan juga sama, yaitu 4014 kkal/kg. Dari persamaan LHV, diketahui bahwa hasil simulasi sudah sesuai dengan dasar teori yang ada, dimana semakin rendah moisture content dari batubara, semakin tinggi pula nilai LHV batubara.

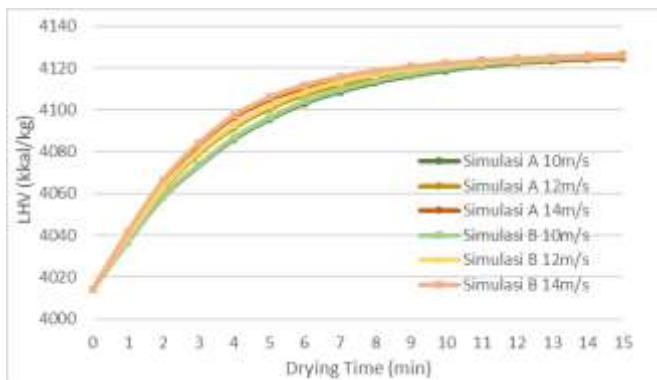
Sama halnya seperti sebelumnya, hasil pengeringan terbaik merupakan hasil pengeringan dengan batubara yang memiliki kenaikan nilai LHV paling tinggi. Pada perhitungan teoritis, pengeringan dengan *Perforated Plate Type-A* dan *Type-B* memiliki hasil yang sama, hal ini dikarenakan kecepatan udara pengering pada *orifice* kedua *perforated plate* memiliki nilai yang sama, sehingga memiliki nilai *reynolds number* yang sama pula. Nilai *reynolds number* yang sama menyebabkan nilai *nusselt number*, koefisien konveksi, dan koefisien perpindahan massa yang sama. Sebagai pembanding, digunakan data pada menit ke-5 pengeringan karena menunjukkan perbedaan yang lebih signifikan. Hasil simulasi pada *Perforated Plate Type-A* dan *Type-B* menunjukkan pengaruh kecepatan masuk udara pengering yang sama pada kenaikan nilai LHV batubara, dimana pada menit ke-5 pengeringan, nilai LHV paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 14m/s dengan nilai LHV simulasi

sebesar 4105,1 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-A dan 4106 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-B. Selanjutnya, nilai LHV kedua paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 13m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4102,6 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-A dan 4104 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-B. Selanjutnya, nilai LHV ketiga paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 12m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4100,6 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-A dan 4101,8 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-B. Selanjutnya, nilai LHV keempat paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 11m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4098.1 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-A dan 4099.3 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-B. Selanjutnya, nilai LHV kelima paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 10m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4095,5 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-A dan 4096,5 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-B. Hasil perhitungan teoritis pada kedua tipe perforated plate juga menunjukkan pengaruh kecepatan udara pengering yang sama pada nilai LHV batubara pada menit ke-5 pengeringan. Nilai LHV batubara paling tinggi dicapai oleh kecepatan 14m/s sebesar 4111,5 kkal/kg. Nilai LHV batubara paling rendah kedua dicapai oleh kecepatan 13m/s sebesar 4109,6 kkal/kg. Nilai LHV batubara paling rendah ketiga dicapai oleh kecepatan 12m/s sebesar 4107,4 kkal/kg. Nilai LHV batubara paling rendah keempat dicapai oleh kecepatan 11m/s sebesar 4105,1. Nilai LHV batubara paling rendah kelima dicapai oleh kecepatan 10m/s sebesar 4102,4 kkal/kg.

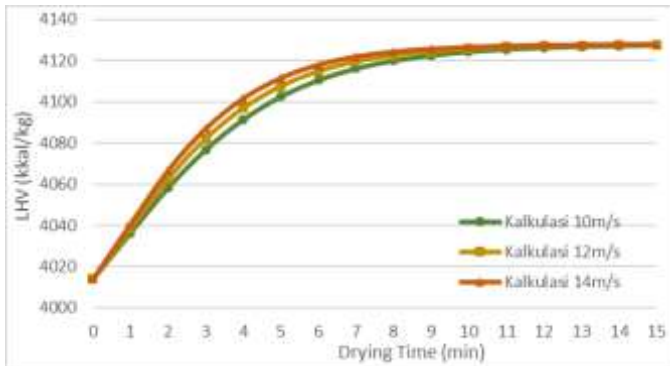
Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap Perforated Plate Type-A dan Type-B, dapat disimpulkan bahwa kecepatan masuk udara pengering memiliki pengaruh terhadap kenaikan nilai LHV pada batubara. Urutan kenaikan nilai LHV selama 15 menit pengeringan dari yang paling baik hingga yang paling buruk adalah 14m/s, 13m/s, 12m/s, 11m/s dan 10m/s. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula

Reynolds number. Semakin tinggi nilai Reynolds number menyebabkan nilai Nusselt number, koefisien konveksi, dan koefisien perpindahan massa yang semakin tinggi. Nilai koefisien konveksi dan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi menyebabkan kenaikan temperatur batubara dan penurunan moisture content yang lebih baik. Oleh karena itu dapat disimpulkan, bahwa kecepatan udara pengering berbanding lurus dengan kecepatan pengeringan batubara. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula kecepatan pengeringan batubara, begitu pula sebaliknya.

- Analisis Pengaruh Tipe *Perforated Plate* Pengering terhadap LHV sebagai Fungsi Waktu Pengeringan



Gambar 4. 22 Grafik simulasi LHV batubara dengan variasi tipe *perforated plate* pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s



Gambar 4. 23 Grafik perhitungan teoritis LHV batubara dengan variasi tipe *perforated plate* pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus dan perhitungan teoritis untuk mengetahui pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap nilai LHV pada batubara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat, dilakukan kalkulasi, untuk kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik LHV terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s untuk Perforated Plate Type-A ditunjukkan pada Gambar 4.19. Hasil simulasi pada kecepatan 10m/s, 12m/s dan 14m/s untuk Perforated Plate Type-B ditunjukkan pada Gambar 4.20. Hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada Gambar 4.21.

Dari seluruh grafik, diketahui bahwa LHV batubara menunjukkan trendline yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Kenaikan nilai LHV sesuai dengan penurunan moisture content yang terjadi. Meskipun nilai HHV tidak dipengaruhi oleh penurunan moisture content karena HHV tidak memperhitungkan penguapan air yang terkandung pada bahan bakar. Seperti yang telah diketahui, nilai HHV dapat diketahui dengan persamaan $HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078ASH$. Kemudian nilai LHV dapat diketahui dengan persamaan $LHV = HHV - \%MC \cdot m_b \cdot h_{fg}$. Karena nilai HHV

yang sama, serta nilai moisture content awal yang sama, maka LHV batubara sebelum dikeringkan juga sama, yaitu 4014 kkal/kg. Dari persamaan LHV, diketahui bahwa hasil simulasi sudah sesuai dengan dasar teori yang ada, dimana semakin rendah moisture content dari batubara, semakin tinggi pula nilai LHV batubara.

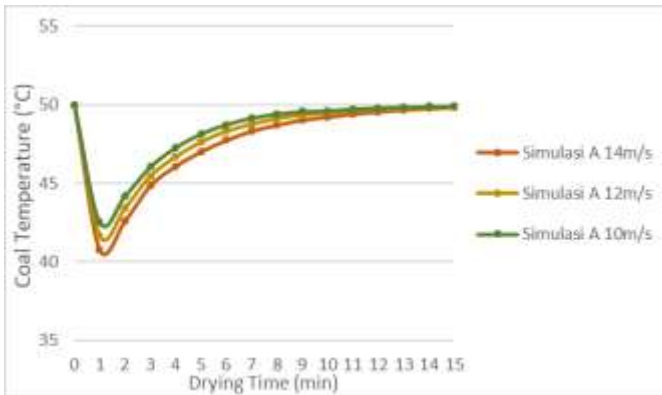
Sama halnya seperti sebelumnya, hasil pengeringan terbaik merupakan hasil pengeringan dengan batubara yang memiliki kenaikan nilai LHV paling tinggi. Pada perhitungan teoritis, pengeringan dengan *Perforated Plate Type-A* dan *Type-B* memiliki hasil yang sama, hal ini dikarenakan kecepatan udara pengering pada *orifice* kedua *perforated plate* memiliki nilai yang sama, sehingga memiliki nilai *reynolds number* yang sama pula. Nilai *reynolds number* yang sama menyebabkan nilai *nusselt number*, koefisien konveksi, dan koefisien perpindahan massa yang sama. Sebagai pembanding, digunakan data pada menit ke-5 pengeringan karena menunjukkan perbedaan yang lebih signifikan. Hasil simulasi pada *Perforated Plate Type-A* dan *Type-B* menunjukkan pengaruh kecepatan masuk udara pengering yang sama pada kenaikan nilai LHV batubara, dimana pada menit ke-5 pengeringan, nilai LHV paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 14m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4105,1 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-A* dan 4106 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai LHV kedua paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 13m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4102,6 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-A* dan 4104 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai LHV ketiga paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 12m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4100,6 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-A* dan 4101,8 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai LHV keempat paling tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 11m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4098.1 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-A* dan 4099.3 kkal/kg untuk *Perforated Plate Type-B*. Selanjutnya, nilai LHV kelima paling

tinggi dicapai oleh variasi kecepatan udara pengering 10m/s dengan nilai LHV simulasi sebesar 4095,5 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-A dan 4096,5 kkal/kg untuk Perforated Plate Type-B. Hasil perhitungan teoritis pada kedua tipe perforated plate juga menunjukkan pengaruh kecepatan udara pengering yang sama pada nilai LHV batubara pada menit ke-5 pengeringan. Nilai LHV batubara paling tinggi dicapai oleh kecepatan 14m/s sebesar 4111,5 kkal/kg. Nilai LHV batubara paling rendah kedua dicapai oleh kecepatan 13m/s sebesar 4109,6 kkal/kg. Nilai LHV batubara paling rendah ketiga dicapai oleh kecepatan 12m/s sebesar 4107,4 kkal/kg. Nilai LHV batubara paling rendah keempat dicapai oleh kecepatan 11m/s sebesar 4105,1. Nilai LHV batubara paling rendah kelima dicapai oleh kecepatan 10m/s sebesar 4102,4 kkal/kg.

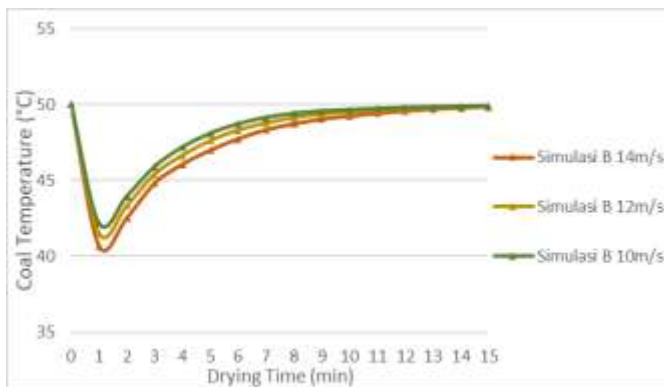
Dari hasil simulasi dan eksperimen terhadap Perforated Plate Type-A dan Type-B, dapat disimpulkan bahwa kecepatan masuk udara pengering memiliki pengaruh terhadap kenaikan nilai LHV pada batubara. Urutan kenaikan nilai LHV selama 15 menit pengeringan dari yang paling baik hingga yang paling buruk adalah 14m/s, 13m/s, 12m/s, 11m/s dan 10m/s. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula Reynolds number. Semakin tinggi nilai Reynolds number menyebabkan nilai Nusselt number, koefisien konveksi, dan koefisien perpindahan massa yang semakin tinggi. Nilai koefisien konveksi dan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi menyebabkan kenaikan temperatur batubara dan penurunan moisture content yang lebih baik. Oleh karena itu dapat disimpulkan, bahwa kecepatan udara pengering berbanding lurus dengan kecepatan pengeringan batubara. Semakin tinggi kecepatan udara pengering, semakin tinggi pula kecepatan pengeringan batubara, begitu pula sebaliknya.

4.5 Analisis Udara Pengering dari Hasil Simulasi

4.5.1 Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pendingin terhadap Temperatur Keluar Udara Pengering Hasil Simulasi



Gambar 4. 24 Grafik simulasi temperatur keluar udara pengering pada *Perforated Plate Type-A* dengan variasi kecepatan udara pengering

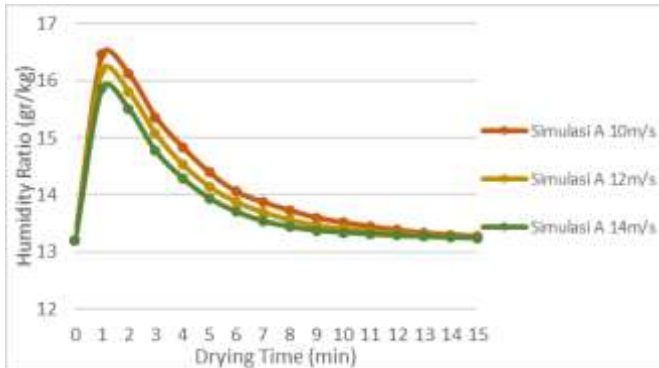


Gambar 4. 25 Grafik simulasi temperatur keluar udara pengering pada *Perforated Plate Type-B* dengan variasi kecepatan udara pengering

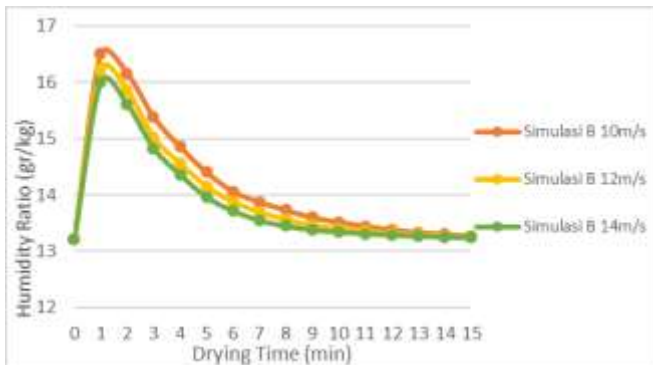
Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus untuk mengetahui pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap temperatur keluar udara pengering setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik temperatur keluar udara pengering terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-A ditunjukkan pada Gambar 4.19. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-B ditunjukkan pada Gambar 4.20.

Dari seluruh grafik, diketahui bahwa temperatur keluar udara pengering menunjukkan trendline yang naik seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya perpindahan panas yang terjadi dari udara pengering ke batubara yang dinamakan proses pemanasan/*sensible heating*. Perhitungan teoritis tidak dapat dilakukan terhadap temperatur keluar udara pengering dikarenakan keterbatasan persamaan yang tersedia. Apabila diperhatikan, kenaikan temperatur udara pengering pada menit ke-8 hingga ke-15 pengeringan lebih landai dibandingkan dengan pada menit ke-1 hingga ke-7. Hal ini dikarenakan selisih temperatur batubara dengan udara pengering yang semakin kecil, sehingga menyebabkan perpindahan panas yang terjadi juga mengalami penurunan.

4.5.2 Analisis Pengaruh Kecepatan Masuk Udara Pendingin terhadap *Humidity Ratio* Udara Pengering Hasil Simulasi



Gambar 4. 26 Grafik simulasi *humidity ratio* keluar udara pengering pada *Perforated Plate Type-A* dengan variasi kecepatan udara pengering



Gambar 4. 27 Grafik simulasi *humidity ratio* keluar udara pengering pada *Perforated Plate Type-B* dengan variasi kecepatan udara pengering

Telah dilakukan simulasi dengan Aspen Plus untuk mengetahui pengaruh kecepatan masuk udara pengering terhadap

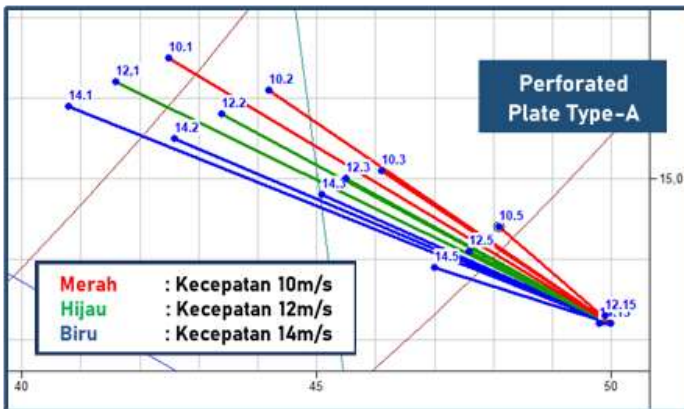
humidity ratio keluar udara pengering dalam satuan gram air/kg udara setiap menit pengeringan. Hasil simulasi kemudian dicatat dan ditampilkan dalam bentuk grafik temperatur keluar udara pengering terhadap waktu pengeringan. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-A ditunjukkan pada Gambar 4.21. Hasil simulasi untuk Perforated Plate Type-B ditunjukkan pada Gambar 4.22. Perhitungan teoritis tidak dapat dilakukan terhadap temperatur keluar udara pengering dikarenakan keterbatasan persamaan yang tersedia.

Seperti yang kita ketahui bersama, *humidity ratio* merupakan perbandingan massa air dengan massa udara yang menyatakan tingkat kelembaban dari udara. Dari seluruh grafik, diketahui bahwa *humidity ratio* keluar udara pengering menunjukkan trendline yang menurun seiring berjalannya waktu pengeringan. Hal ini sesuai dengan penurunan drying rate seiring berjalannya waktu pengeringan, sehingga, massa air yang berpindah dari batubara ke udara pengering juga semakin sedikit. Karena perpindahan massa terjadi dari batubara menuju ke udara pengering, maka kandungan air yang terdapat pada udara pengering setelah melewati batubara tidak mungkin lebih rendah daripada kandungan air yang terdapat pada udara pengering sebelum melewati batubara. Oleh karena itu, nilai *humidity ratio* keluar udara pengering tidak akan lebih rendah daripada *humidity ratio* masuk udara pengering. Hal ini yang menyebabkan trendline grafik *humidity ratio* pada seluruh variasi kecepatan akan perlahan mencapai datar seiring waktu pengeringan.

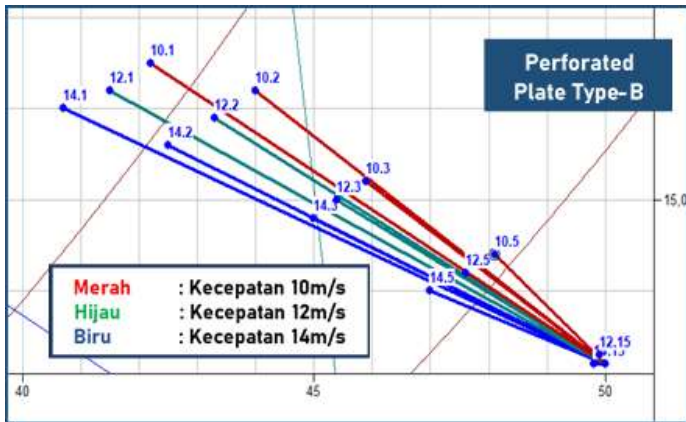
Pada grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa kecepatan masuk udara pengering memiliki pengaruh yang signifikan pada menit awal pengeringan. Terlihat bahwa nilai *humidity ratio* yang lebih tinggi dimiliki oleh kecepatan masuk udara pengering yang lebih rendah. Kita tahu bahwa semakin tinggi kecepatan masuk udara pengering, massa air yang berpindah dari batubara ke udara pengering juga lebih tinggi, sesuai dengan pengurangan moisture content yang terjadi pada batubara. Akan tetapi, semakin tinggi

kecepatan masuk udara pengering, semakin tinggi pula massa alir udara pengering. Massa alir yang tinggi menyebabkan faktor pembagi dari humidity ratio juga lebih tinggi, sehingga nilai humidity ratio juga lebih rendah. Karena peningkatan massa air yang berpindah dari batubara ke udara pengering lebih rendah daripada peningkatan massa alir udara pengering seiring peningkatan kecepatan masuk udara pending, maka nilai humidity ratio udara pengering yang dimiliki oleh udara dengan kecepatan masuk udara pengering yang lebih tinggi akan lebih rendah daripada yang dimiliki oleh udara dengan kecepatan masuk udara pengering yang lebih rendah.

4.5.3 Analisis Psychrometric Chart Udara Pengering Hasil Simulasi



Gambar 4. 28 Psychrometric chart plot udara keluar Perforated Plate Type-A pada kecepatan udara masuk 10m/s, 12m/s, dan 14m/s



Gambar 4. 29 Psychrometric chart plot udara keluar Perforated Plate Type-A pada kecepatan udara masuk 10m/s, 12m/s, dan 14m/s

Setelah data temperatur dan humidity ratio keluar udara pengering dikumpulkan dari simulasi, dilakukan plot ke psychrometric chart untuk menganalisa perubahan kondisi udara pengering setiap menit pengeringan. Plot psychrometric chart untuk udara keluar Perforated Plate Type-A dapat dilihat pada Gambar 4.23. Plot psychrometric chart untuk udara keluar Perforated Plate Type-B dapat dilihat pada Gambar 4.24.

Seperti yang telah diketahui, proses pendinginan/pemanasan dapat tergambar dengan perpindahan titik secara horizontal kekiri/kanan. Sedangkan, proses pelembaban/pengeringan dapat tergambar dengan perpindahan titik secara vertical keatas/bawah. Karena terjadi perpindahan panas dari udara ke batubara, juga perpindahan massa air dari batubara ke udara, maka titik kondisi udara keluar pengering akan menuju kiri atas dari titik kondisi udara masuk pengering. Karena nilai humidity ratio yang lebih tinggi, maka titik posisi udara keluaran pada variasi kecepatan yang lebih rendah akan memiliki letak yang lebih tinggi, begitu pula sebaliknya. Selain itu, karena temperatur keluar udara pengering

yang lebih rendah pada waktu pengeringan yang sama, maka titik posisi udara keluaran pada variasi kecepatan yang lebih rendah akan memiliki letak yang lebih ke kanan pada waktu pengeringan yang sama.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dari simulasi dan perhitungan teoritis serta seluruh analisis yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang dapat ditarik menjadi kesimpulan penting pada penelitian ini antara lain:

1. Kinerja pengeringan batubara terbaik dicapai menggunakan variasi kecepatan udara 14 m/s dengan *Perforated Plate Type-B*, dimana total massa air yang dapat dilepas batubara yaitu sebesar 57,482 gram, sedangkan pada variasi kecepatan udara 14 m/s dengan *Perforated Plate Type-A*, total massa air yang dapat dilepas batubara yaitu sebesar 57,801 gram. Perbedaan *Perforated Plate Type-A* dan *Type-B* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja pengeringan batubara karena memiliki luas *open-area* yang sama. Akan tetapi *Perforated Plate Type-B* menghasilkan pengeringan yang sedikit lebih baik dikarenakan persebaran *orificenya* yang lebih merata.
2. Dari variasi kecepatan dan tipe *perforated plate* yang telah ditentukan, kecepatan 14 m/s dengan variasi *Perforated Plate Type-B* memiliki nilai peningkatan *humidity ratio* paling rendah yaitu dari 15,86 gr/kg pada menit ke-1 menuju 13,24 gr/kg pada menit ke-15. Penurunan *humidity* disebabkan semakin banyaknya massa alir udara pada kecepatan 14 m/s jika dibandingkan dengan kecepatan 13 m/s, 12 m/s, 11 m/s, dan 10 m/s.
3. Berdasarkan variasi kecepatan dan tipe *perforated plate* yang telah ditentukan, kecepatan 14 m/s dengan variasi *Perforated Plate Type-B* memiliki selisih kenaikan temperatur paling tinggi, yaitu dari temperatur 40,66 °C

pada menit ke-1 menuju temperatur 49,83 °C pada menit ke-15. Selisih temperature tertinggi ini dikarenakan pada kecepatan 14 m/s moisture content pada batubara lebih cepat menguap sehingga temperatur outlet akan hampir sama dengan temperatur inlet.

4. Dari ketiga variasi kecepatan dan tipe *perforated plate* yang telah ditentukan, kecepatan 14 m/s dengan variasi *Perforated Plate Type-B* memiliki nilai *drying rate* sebesar 0,85463 kg/jam. *Moisture content* akan cepat berkurang pada menit ke-1 sampai menit ke-5 kemudian menunjukkan nilai yang relative konstant setelah menit ke-9, sehingga untuk menghemat daya pengeringan, pada menit ke-9 hingga 15 kecepatan pengeringan diganti menjadi 12 m/s kemudian diturunkan lagi menjadi 10 m/s.
5. Pada *psychrometric chart* kondisi udara mengalami 2 proses yaitu proses *cooling and humidifying* (bergerak ke arah kiri atas), lalu udara mengalami proses *heating and dehumidifying* (bergerak ke arah kanan bawah) akibat terjadinya perpindahan panas dan massa antara udara.

5.2 Saran

Berdasarkan simulasi dengan Aspen Plus terhadap proses pengeringan batubara dengan menggunakan Perforated Plate Fluidized Bed Coal Dryer yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa poin yang dapat penulis sarankan:

1. Sebaiknya penelitian dilakukan simulasi dengan software lain yang lebih fokus terhadap analisa secara mekanikal.
2. Direkomendasikan untuk dilakukan penelitian lanjut dimana terjadi perubahan kecepatan masuk udara pengering sehingga dapat menghemat daya yang digunakan untuk kompresor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ada E. Ramazanova, I. M. (2018). Temperature Effect on the Thermal Conductivity of Black Coal.
- [2] E. K. Levy, N. S. (2002). Use of Coal Drying To Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants.
- [3] F. P. Incropera, D. P. (2011). *Fundamental of Heat and Mass Transfer 7th Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Harvov E. Belkin, S. J. (2007). *Geochemistry of Selected Coal Samples from Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, and Papua, Indonesia*. Virginia: USGS.
- [5] M. E. Simanjuntak, P. D. (2018). Experimental and Numerical Study of Coal Swirl Fluidized Bed Drying on Different Angle of Guide Vane.
- [6] Monika Kosowska-Golachowska, W. G. (2014). Determination of The Effective Thermal Conductivity of Solid Fuels by The Laser Flash Method.
- [7] Moran, M. S. (2014). *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [8] NASA. (Diakses Mei 2020). *Drag Coefficient*. USA: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html>.
- [9] Parikh, J. (2004). A Correlation for Calculating HHV from Proximate Analysis of Solid Fuels.
- [10] PT. PLN (PERSERO). (2018). *Pengujian Heat Rate dan Efisiensi PLTU Ombilin*. Jakarta.
- [11] PT. PLN (PERSERO). (2019). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2019 - 2028*. Indonesia: Kementerian ESDM.

- [12] R. H. Perry, D. W. (2009). *Chemical Engineers' Handbook, 7th ed., vol. 27, no. 9*. New York: McGraw-Hill.
- [13] Sandler, S. I. (n.d.). *Using Aspen Plus in Thermodynamics Instruction A Step by Step Guide*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Speight, J. G. (2005). *Handbook of Coal Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [15] Tri, N. H. (2018). Studi Eksperimen Pengaruh Diameter Perforated Plate (5mm dan 10mm) dan Kecepatan Udara Diatas Fluidisasi terhadap Kinerja Coal Dryer.

LAMPIRAN

A. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Sebagai Perbandingan dengan Eksperimen Nugroho Hutomo Tri

Tabel A. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :		
Perforated Plate Type	B	
Pore Diameter	0.005	m
No. of Pore	324	pcs
Pipe Diameter	0.085	m
Coal Mass	300	gram
Initial MC	40	%
Coal Dry Mass	285.7142857	gram
Coal Temperature	27	C
	300	K
Air Mass Flow Rate	0.339114286	kg/s
Air Flow Temperature	50.8	C
	323.8	K
Relative Humidity	17,6	%
Air Velocity Inlet	13	m/s
Air Velocity at Pore	11.59567901	m/s

Tabel A. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1.0821936 kg/m ³
	Niu	μ	1.95834E-05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.703668
	Thermal Conductivity	k	0.0280612 W/m.K
	Alfa	α	2.60224E-05 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2380880 J/kg
	Reynold Number	Re	2563.149452
			TURBULENT FLOW

Tabel A. 6 Hasil simulasi

SIMULATION							
Min.	BATUBARA			UDARA PENERING			
	%MC	Temp.	Mass Flow	Temp.		H2O Mass Flow	
	%	°C	kg/hr	°C	K	kg/hr	gr/min
0	33.034	27	18	49.7	322.7	0	0
1	27.753	32.65	16.68405	47.419	320.42	17.9667485	15.8455584
2	23.392	37.445	15.734337	48.059	321.06	17.8009606	13.0824265
3	19.864	40.871	15.041723	48.517	321.52	17.6509682	10.5825527
4	18.205	43.048	14.736668	49.171	322.17	17.3146073	4.97653803
5	17.138	44.806	14.546821	49.365	322.37	17.2081614	3.20244031
6	16.338	46.384	14.407729	49.473	322.47	17.1600066	2.39986043
7	15.921	47.212	14.33633	49.572	322.57	17.0910138	1.24997987
8	15.571	47.697	14.276925	49.597	322.6	17.078987	1.04953355
9	15.296	48.031	14.230424	49.631	322.63	17.0656749	0.82766553
10	15.105	48.348	14.198453	49.644	322.64	17.0503463	0.57218872
11	14.95	48.605	14.172561	49.655	322.65	17.0439327	0.46529453
12	14.844	48.806	14.154936	49.669	322.67	17.0350762	0.31768723
13	14.763	48.929	14.141468	49.677	322.68	17.0306138	0.24331356
14	14.69	48.929	14.129496	49.679	322.68	17.0290147	0.2166624
15	14.632	49.054	14.119827	49.683	322.68	17.0265299	0.17524862

B. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-A dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 10 m/s

Tabel B. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :	
Perforated Plate Type	A
Pore Diameter	0.01 m
No. of Pore	81 pcs
Pipe Diameter	0.085 m
Coal Mass	300 gram
Initial MC	40 %
Coal Dry Mass	285.742857 gram
Coal Temperature	27 C
	300 K
Air Mass Flow Rate	0.339114286 kg/s
Air Flow Temperature	50 C
	323 K
Relative Humidity	17 %
Air Velocity Inlet	10 m/s
Air Velocity at Pore	8.919753086 m/s

Tabel B. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1.084856 kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E- 05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378
	Thermal Conductivity	k	0.028002 W/m.K
	Alfa	α	0.000025904 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800 J/kg
Reynold Number		Re	1980.322457 LAMINAR FLOW

Tabel B. 6 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	2.88624526	50
1	30.04220648	35.41963357	3.598648093	42.32327544
2	26.4822105	38.34488279	3.501683025	44.05794187
3	23.84087553	40.75701813	3.326612835	45.72805525
4	21.66959963	42.13420899	3.238682245	47.08843319
5	20.01689014	43.48124831	3.148684864	48.13966389
6	18.71986685	44.52319904	3.088800287	48.7447792
7	17.74962927	45.32673903	3.035801176	49.16290509
8	17.00601577	45.78646438	2.999756404	49.42198277
9	16.452017	46.22804977	2.970183238	49.57759443
10	16.01499694	46.58509228	2.952092624	49.66509176
11	15.67848295	46.83271988	2.936727433	49.73979365
12	15.42437038	47.01908373	2.924237696	49.80400924
13	15.23960421	47.18924574	2.9137995	49.84604486
14	15.09983294	47.31230069	2.907050882	49.88460681
15	14.99798277	47.38822948	2.901384956	49.91388015

C. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-A dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 11 m/s

Tabel C. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :	
Perforated Plate Type	A
Pore Diameter	0.01 m
No. of Pore	81 pcs
Pipe Diameter	0.085 m
Coal Mass	300 gram
Initial MC	40 %
Coal Dry Mass	285.7142857 gram
Coal Temperature	27 C
	300 K
Air Mass Flow Rate	0.339114286 kg/s
Air Flow Temperature	50 C
	323 K
Relative Humidity	17 %
Air Velocity Inlet	11 m/s
Air Velocity at Pore	9.811728395 m/s

Tabel C. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)				
AIR	Density	ρ	1.084856	kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05	N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378	
	Thermal Conductivity	k	0.028002	W/m.K
	Alfa	α	0.000025904	m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800	J/kg
Reynold Number		Re	2178.354703	
			LAMINAR FLOW	

Tabel C. 6 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	3.174869786	50
1	29.85858403	35.68611869	3.920324661	42.00984636
2	26.11681313	38.65036046	3.820495335	43.76451665
3	23.37845217	41.08125644	3.629681955	45.73196372
4	21.18089125	42.46428943	3.529866137	46.90747723
5	19.56014765	43.79034847	3.430932867	47.87941083
6	18.33021309	44.79456575	3.366039105	48.51892222
7	17.44020386	45.54829419	3.311502923	48.71603057
8	16.77104809	45.96343883	3.27668348	49.29823491
9	16.28035878	46.36031846	3.249029779	49.49427962
10	15.89306567	46.68287941	3.23311585	49.58691434
11	15.59620675	46.90519237	3.219342296	49.68790589
12	15.37500099	47.07137847	3.207910302	49.76854614
13	15.20773975	47.22489538	3.199797586	49.82057164
14	15.08481812	47.33610855	3.193158786	49.86664128
15	14.99367951	47.40500598	3.188413252	49.90194852

D. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-A dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 12 m/s

Tabel D. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :	
Perforated Plate Type	A
Pore Diameter	0.01 m
No. of Pore	81 pcs
Pipe Diameter	0.085 m
Coal Mass	300 gram
Initial MC	40 %
Coal Dry Mass	285.7142857 gram
Coal Temperature	27 C
	300 K
Air Mass Flow Rate	0.339114286 kg/s
Air Flow Temperature	50 C
	323 K
Relative Humidity	17 %
Air Velocity Inlet	12 m/s
Air Velocity at Pore	10.7037037 m/s

Tabel D. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1.084856 kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378
	Thermal Conductivity	k	0.028002 W/m.K
	Alfa	α	0.000025904 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800 J/kg
Reynold Number		Re	2376.386949
			TURBULENT FLOW

Tabel D. 3 *Properties* batubara

BATUBARA			
Diameter 1butir batubara	D	4	mm
		0.004	m
Volume 1Butir Batubara	V	3.35238E-08	m ³
Luas Permukaan 1butir batubara	As	5.02857E-05	m ²
Density Batubara	ρ	1650	kg/m ³
Massa 1butir batubara	m	5.5343E-05	kg

Tabel D. 4 Perhitungan teoritis perpindahan panas secara transient

CALCULATION														
AIR TEMPERATURE		COAL TEMPERATURE		TERMAL CONDUCTIVITY	MO SOLID TEMPERATURE	COAL THERMAL DIFFUSIVITY	COAL THERMAL CONDUCTIVITY	CONVECTION COEFFICIENT	BLOT NUMBER	FOURIER NUMBER	Table D.1		Next Coal Temp	
t	K	t	K	W/mk	°C	m ² /s	W/mK	h/m ²	Bi	Fourier	η	C1	η	ε
C	K	C	K	W/mK	°C	m ² /s	W/mK	h/m ²	Bi	Fourier	η	C1	Core	Surface
0	323	27	300	0.36909235	0.00003949	7.2295E-08	28.604381	232.248699	1759.03	0.2778192	0.1029	0.8595	0.655	308.714
5	323	36.751901	306.751901	0.36904302	1.6079E-05	7.3620E-08	28.427577	199.28327	1586976	0.27600105	0.1663	0.8303	0.804	314.072
10	323	41.074007	310.074301	0.36905648	1.0198E-05	7.4388E-08	28.371655	98.018704	10884.09	0.27692232	0.0443	0.8486	0.8304	317.208
15	323	44.28276445	315.2832944	0.37018103	5.9725E-05	7.4976E-08	28.394466	58.243425	6669.972	0.28201594	0.0273	0.8459	0.8306	318.2421
20	323	45.3424509	316.3424509	0.37497985	1.0378E-05	7.5925E-08	28.2854025	36.079601	3558.9795	0.28329237	0.0179	0.8443	0.842	320.652
25	323	47.62949445	320.62949445	0.37644778	1.9497E-05	7.5777E-08	28.2844707	20.8654931	1957.814	0.28368448	0.0103	0.8423	0.8423	321.4982
30	323	48.4862976	321.4862976	0.37789324	3.37789324	7.5502E-08	28.251991	12.7720994	1047.788	0.28352777	0.0075	0.8428	0.8441	322.027
35	323	49.02760783	322.02760783	0.37842841	5.49492841	7.5525E-08	28.2435957	7.24482731	628.83396	0.28361608	0.0052	0.8442	0.8446	322.378
40	323	49.378049	322.378049	0.37854278	1.0516E-05	7.5833E-08	28.237482	4.9737879	388.26612	0.28366102	0.0039	0.8449	0.8451	322.5954
45	323	49.5933902	322.5933902	0.38004068	1.9262E-05	7.5888E-08	28.2325783	3.3784948	2404.6774	0.28376529	0.0029	0.8449	0.8454	322.7389
50	323	49.73982528	322.73982528	0.38036354	3.1533E-05	7.5868E-08	28.231041	2.3333467	1539.9807	0.28381697	0.0023	0.845	0.8458	322.831
55	323	49.83392028	322.83392028	0.38058233	5.6937E-05	7.7020E-08	28.2298302	1.67522982	97.5229328	0.28389306	0.0017	0.844	0.8458	322.891
60	323	49.8910717	322.8910717	0.38070771	1.0454E-05	7.5716E-08	28.228923	1.1483596	6398.9385	0.28393637	0.0014	0.844	0.8459	323.007
65	323	49.93097861	322.93097861	0.38079988	1.9423E-05	7.5776E-08	28.228381	0.8150844	3839.9794	0.28397356	0.0012	0.8458	0.8459	322.956
70	323	49.95457078	322.95457078	0.38094366	3.4954E-05	7.6720E-08	28.2278071	0.6203028	2337.7415	0.28399167	0.0011	0.8454	0.846	322.971
75	323	49.97065863	322.97065863	0.38097807	1.0442E-05	7.5722E-08	28.227625	0.45760541	1307.8773	0.28398068	0.001	0.8454	0.846	322.981

Tabel D. 5 Perhitungan teoritis perpindahan massa

Waktu Pengeringan	Massa Batubara	Luas Permukaan Batubara	Temperatur Film	Thermal Conductivity Udara	Massa Diffusivitas Air pada Udara	Thermal Diffusivitas Udara	Levis Number	Mass Transfer Coefficient	Drying Rate	ΔMC	MOISTURE CONTENT
min	g	m ²	K	W/mk	m ² /s	m ² /s	-	m/s	kg/s	%	%
0	300	0.27272727	315	0.30600309	0.000300875	0.000024202	0.0804387	0.07242373	0.0002	0.268	4.2287
1	289	0.26272727	315.879496	0.36874722	0.000300875	2.48496E-05	0.0025911	0.070898926	0.0002	0.827	4.0925
2	278	0.25272727	316.530747	0.37272195	0.000300875	2.52330E-05	0.0033863	0.070324188	0.0002	0.838	3.2866
3	267	0.24272727	320.14897	0.37555887	0.000300875	2.5481E-05	0.00484687	0.069754625	0.0001	0.848	2.4767
4	256	0.23272727	321.71226	0.37734053	0.000300875	2.56333E-05	0.006596	0.06947374	7E-05	0.4888	1.7526
5	245	0.22272727	323.825974	0.37847376	0.000300875	2.57302E-05	0.0085161	0.06903079	5E-05	2.9075	1.3443
6	234	0.21272727	322.24476	0.37526359	0.000300875	2.57922E-05	0.0087241	0.069780796	3E-05	0.842	0.7144
7	223	0.20272727	322.53534	0.37857639	0.000300875	2.5832E-05	0.0085863	0.069898542	2E-05	1.0634	0.4769
8	212	0.19272727	322.686049	0.38024049	0.000300875	2.58876E-05	0.0085943	0.06962508	1E-05	0.6492	0.3062
9	201	0.18272727	322.797695	0.38149281	0.000300875	2.5914E-05	0.0085996	0.069895657	7E-06	0.3268	0.1853
10	190	0.17272727	322.865426	0.38063273	0.000300875	2.58847E-05	0.0086013	0.069860768	4E-06	0.2387	0.1041
11	179	0.16272727	322.946966	0.38075627	0.000300875	2.5891E-05	0.0086054	0.069844527	2E-06	0.1407	0.0786
12	168	0.15272727	322.945559	0.38082346	0.000300875	2.58959E-05	0.0086088	0.069834051	1E-06	0.0895	0.0497
13	157	0.14272727	322.864836	0.38069603	0.000300875	2.58988E-05	0.0086083	0.069827285	6E-07	0.0482	0.0314
14	146	0.13272727	322.977288	0.38094144	0.000300875	2.59006E-05	0.0086044	0.069822204	5E-07	0.0289	0.0198
15	135	0.12272727	322.865329	0.38090419	0.000300875	2.59038E-05	0.0086083	0.069822034	3E-07	0.0168	0.0125

Tabel D. 6 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	3.463494312	50
1	29.67891157	35.92628248	4.241290229	41.64257728
2	25.71529062	38.92068489	4.1461172	43.4221338
3	22.87876552	41.38910284	3.932643685	45.45680149
4	20.70776857	42.79035202	3.812382897	46.68847066
5	19.14546398	44.0759734	3.709112702	47.64247432
6	18.017936	45.0332251	3.637989695	48.32488802
7	17.18694836	45.72438242	3.5906473	48.78247611
8	16.58074047	46.100882	3.555481973	49.13318046
9	16.14389971	46.46078195	3.529379896	49.37044925
10	15.8033109	46.75531481	3.514638502	49.51015899
11	15.54182982	46.95718344	3.502625632	49.62780564
12	15.33934963	47.1081989	3.493716764	49.713156
13	15.18994425	47.24910956	3.485749597	49.78589005
14	15.07662269	47.35278364	3.480349363	49.83819409
15	14.99081902	47.41494448	3.476241988	49.8882462

E. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-A dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 13 m/s

Tabel E. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :	
Perforated Plate Type	A
Pore Diameter	0.01 m
No. of Pore	81 pcs
Pipe Diameter	0.085 m
Coal Mass	300 gram
Initial MC	40 %
Coal Dry Mass	285.7142857 gram
Coal Temperature	27 C
	300 K
Air Mass Flow Rate	0.339114286 kg/s
Air Flow Temperature	50 C
	323 K
Relative Humidity	17 %
Air Velocity Inlet	13 m/s
Air Velocity at Pore	11.59567901 m/s

Tabel E. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1084856 kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E- 05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378
	Thermal Conductivity	k	0.028002 W/m.K
	Alfa	α	0.000025904 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800 J/kg
Reynold Number		Re	2574.419194 TURBULENT FLOW

Tabel E. 6 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	3.752118112	50
1	29.51508665	36.14401919	4.559402514	41.24031818
2	25.43319667	39.18401815	4.453905877	43.19087573
3	22.53215303	41.64775808	4.230527167	45.18634581
4	20.32386745	43.03137026	4.105720303	46.32703258
5	18.79544791	44.29851904	3.991452096	47.31838564
6	17.71089383	45.21656836	3.919351865	48.00188948
7	16.74622455	45.85353076	3.899252877	48.57072442
8	16.21650959	46.24597872	3.832132717	48.9531889
9	15.83645169	46.5829417	3.809222592	49.22764123
10	15.51791736	46.76873572	3.799796653	49.39270736
11	15.2832962	47.00220586	3.787124582	49.53926159
12	15.10760496	47.15929431	3.778270488	49.65774776
13	14.97240715	47.29855307	3.772207514	49.73882403
14	14.87147718	47.39831881	3.767095289	49.80859571
15	14.79629783	47.45977471	3.763262849	49.85974513

F. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-A dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 14 m/s

Tabel F. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :	
Perforated Plate Type	A
Pore Diameter	0.01 m
No. of Pore	81 pcs
Pipe Diameter	0.085 m
Coal Mass	300 gram
Initial MC	40 %
Coal Dry Mass	285.7142857 gram
Coal Temperature	27 C
	300 K
Air Mass Flow Rate	0.339114286 kg/s
Air Flow Temperature	50 C
	323 K
Relative Humidity	17 %
Air Velocity Inlet	14 m/s
Air Velocity at Pore	12.48765432 m/s

Tabel F. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1084856 kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378
	Thermal Conductivity	k	0.028002 W/m.K
	Alfa	α	0.000025904 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800 J/kg
Reynold Number		Re	2772.45144 TURBULENT FLOW

Tabel F. 3 *Properties* batubara

BATUBARA				
Diameter 1butir batubara	D	4	mm	
		0.004	m	
Volume 1Butir Batubara	V	3.35238E-08	m ³	
Luas Permukaan 1butir batubara	As	5.02857E-05	m ²	
Density Batubara	ρ	1650	kg/m ³	
Massa 1butir batubara	m	5.53143E-05	kg	

Tabel F. 4 Perhitungan teoritis perpindahan panas secara transient

CALCULATION														
AIR TEMPERATURE		COAL TEMPERATURE		Thermal Conductivity	NU SOLID TEMPERATURE	COAL THERMAL DIFFUSIVITY	NU FLUID TEMPERATURE	CONVECTION COEFFICIENT	BOLT NUMBER	FOURIER NUMBER	Table 5.1		Next Coal Temp	
t	K	t	K	W/mK	No/No2	m ² /s	No/No2	W/m ² K			Fi	CI	h	h
C	K	C	K											
50	323	27	300	0.347066235	0.0000948	7.2295E-08	31000917	219.203992	127.89921	0.2771892	17752	1.3792	0.0862	0.6862
50	323	36.5930948	308.539095	0.357026397	1.6930E-05	7.2295E-08	30303761	216.572039	126927.86	0.27945954	17720	1.3668	0.0865	0.6864
50	323	43.9444902	314.844498	0.366626266	1.9644E-05	7.4520E-08	30730305	216.572039	127075.474	0.28077855	17708	1.3608	0.0863	0.6863
50	323	45.5477236	318.04774	0.370664052	1.9165E-05	7.3000E-08	308793397	216.759258	116426.844	0.28195481	16885	1.3581	0.0861	0.6861
50	323	47.0303076	320.003072	0.373367642	1.9404E-05	7.5284E-08	30844264	216.520038	116289.819	0.28293044	16882	1.3564	0.0818	0.6818
50	323	48.3474485	321.847442	0.375033689	1.9499E-05	7.5449E-08	308269897	216.3028391	116103.036	0.283820789	16782	1.3554	0.0815	0.6815
50	323	48.8803268	31888036	0.37581986	1.9493E-05	7.5566E-08	30.688777	216.2787431	115986.877	0.283855564	16724	1.3548	0.0814	0.6814
50	323	49.1970762	322.379766	0.379402034	1.9574E-05	7.5926E-08	30.6971881	216.242653	116022.085	0.283826969	16704	1.3544	0.0810	0.6810
50	323	49.5197177	322.889373	0.380002707	1.9525E-05	7.5864E-08	30.5976763	216.1027947	115733.807	0.28371474	16691	1.3542	0.0814	0.6814
50	323	49.7427638	322.742765	0.380377083	1.9533E-05	7.5888E-08	30.5593939	216.1730542	115616.907	0.283833342	16682	1.354	0.0816	0.6816
50	323	49.8419551	323.841951	0.38057178	1.9531E-05	7.5703E-08	30.522677	216.163584	11554474	0.283888378	16675	1.3538	0.0818	0.6818
50	323	49.9707985	322.802798	0.380727892	1.9547E-05	7.5739E-08	30.5819301	216.163085	115497.004	0.283922629	16673	1.3538	0.0819	0.6819
50	323	49.9440234	323.944023	0.38091769	1.9542E-05	7.5778E-08	30.5565329	216.1402504	11549992	0.28391989	16671	1.3538	0.0819	0.6819
50	323	49.9830498	322.983047	0.380963045	1.9549E-05	7.5792E-08	30.5901868	216.1469313	115453333	0.283969274	16667	1.3538	0.0815	0.6815
50	323	49.9773763	322.977376	0.380984684	1.9544E-05	7.5723E-08	30.5592423	216.1443914	115443008	0.283964608	16669	1.3537	0.0815	0.6815
50	323	49.9802648	322.980266	0.38098181	1.9544E-05	7.5725E-08	30.5897021	216.1436399	115438862	0.283966591	16668	1.3537	0.0815	0.6815

Tabel F. 5 Perhitungan teoritis perpindahan massa

Waktu Pengerinan	Massa Batubara	Luas Permukaan Batubara	Temperatur Film	Thermal Conductivity Ubara	Mass Diffusivity Air pada Udara (Dab)	Thermal Diffusivity Ubara	Lewis Number	Mass Transfer Coefficient	Drying Rate	ΔMC	MOISTURE CONTENT
o	g	m ²	K	W/mK	m ² /s	m ² /s	Le	kg/m ² s	%	%	%
0	300	0.277272727	3115	0.365001439	0.000300875	0.000024202	0.08904387	0.078785972	0.0002	15.749	4.583
1	288	0.262727272	316.289951	0.36885719	0.000300875	2.4908E-05	0.0827851	0.078748346	0.0002	12.798	4.4284
2	278	0.252727272	318.972249	0.371354399	0.000300875	2.53079E-05	0.0841M3	0.07892324	0.0002	0.47419	3.4083
3	267	0.242727272	320.562089	0.372689177	0.000300875	2.55435E-05	0.0849863	0.079463489	0.0001	6.5326	2.4467
4	256	0.232727272	321.51564	0.37378792	0.000300875	2.56842E-05	0.0853652	0.07910035	7E-05	4.852	1.6349
5	245	0.222727272	322.092371	0.37893487	0.000300875	2.57897E-05	0.0858491	0.07920269	4E-05	2.5455	1.039
6	234	0.212727272	322.444478	0.379702108	0.000300875	2.58277E-05	0.0858221	0.079489706	2E-05	1.4938	0.3683
7	223	0.202727272	322.659388	0.380192758	0.000300875	2.58535E-05	0.0859578	0.079482537	1E-05	0.8222	0.3887
8	212	0.192727272	322.790644	0.38047724	0.000300875	2.58735E-05	0.0859926	0.079476209	8E-06	0.4754	0.2242
9	201	0.182727272	322.87318	0.380857642	0.000300875	2.58885E-05	0.0860323	0.079473442	5E-06	0.2725	0.1556
10	190	0.172727272	322.920949	0.380766469	0.000300875	2.58923E-05	0.0860567	0.079472086	3E-06	0.1652	0.0917
11	179	0.162727272	322.9554	0.380983557	0.000300875	2.58963E-05	0.0860716	0.079470374	1E-06	0.0878	0.0491
12	168	0.152727272	322.97017	0.38087405	0.000300875	2.58986E-05	0.0860809	0.079469352	8E-07	0.0495	0.0295
13	157	0.142727272	322.983623	0.380904133	0.000300875	2.59019E-05	0.0860865	0.079468974	5E-07	0.0278	0.0177
14	146	0.132727272	322.988899	0.380918653	0.000300875	2.59022E-05	0.08609	0.079468882	3E-07	0.0165	0.0106
15	135	0.122727272	322.99305	0.380925881	0.000300875	2.59030E-05	0.0860921	0.079468527	2E-07	0.0086	0.0064

Tabel A. 7 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		A	KECEPATAN	14 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	4.040743364	50
1	29.28207755	36.34503301	4.889969404	40.77003352
2	25.08102051	39.42724263	4.761761289	42.84106517
3	21.88788133	41.40594879	4.565751517	44.86057066
4	19.66831944	43.24213073	4.394025434	45.98552485
5	18.22183897	44.55616466	4.265865858	46.97589201
6	17.20939844	45.43445152	4.196036994	47.67232113
7	16.54083116	46.0399531	4.14227366	48.28072846
8	16.06705014	46.345985	4.112211901	48.71607047
9	15.67746328	46.63868251	4.099233017	49.03896132
10	15.40555389	46.88598939	4.081425796	49.24551198
11	15.19203899	47.05716502	4.07260209	49.42516252
12	15.03076957	47.1855571	4.064755123	49.56760877
13	14.90534455	47.30848013	4.059388054	49.68234595
14	14.80445057	47.39918294	4.055722673	49.76087893
15	14.73329643	47.45602624	4.051297377	49.82765858

G. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-B dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 10 m/s

Tabel G. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :		
Perforated Plate Type	B	
Pore Diameter	0.005	m
No. of Pore	324	pcs
Pipe Diameter	0.085	m
Coal Mass	300	gram
Initial MC	40	%
Coal Dry Mass	285.7142857	gram
Coal Temperature	27	C
	300	K
Air Mass Flow Rate	0.339114286	kg/s
Air Flow Temperature	50	C
	323	K
Relative Humidity	17	%
Air Velocity Inlet	10	m/s
Air Velocity at Pore	8.919753086	m/s

Tabel G. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1.084856 kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378
	Thermal Conductivity	k	0.028002 W/m.K
	Alfa	α	0.000025904 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800 J/kg

Reynold Number	Re	1980.322457 LAMINAR FLOW
----------------	----	------------------------------------

Tabel G. 3 *Properties* batubara

BATUBARA			
Diameter 1butir batubara	D	4	mm
		0.004	m
Volume 1Butir Batubara	V	3.35238E-08	m3
Luas Permukaan 1butir batubara	As	5.02857E-05	m2
Density Batubara	ρ	1650	kg/m3
Massa 1butir batubara	m	5.5343E-05	kg

Tabel G. 4 Perhitungan teoritis perpindahan panas secara transient

CALCULATION																
AIR TEMPERATURE		COAL TEMPERATURE		Thermal Conductivity	NU SOLID TEMPERATURE	COAL THERMAL DIFFUSIVITY	NUBLETT NUMBER	CONVECTION COEFFICIENT	BIOT NUMBER	FOURIER NUMBER	Biot No.			Heat Coal Temp.		
t	K	K	K	W/mK	W/mK	m ² /s	m ² /s	W/m ² °C	no	no	0	1	1/2	K	°C	
50	353	27	307	0.34062626	0.0000848	7.229E-08	26.2091697	82.27434	1.006707	0.27789182	16272	13459	0.6660	307.601	307.9007	
50	323	24.9007630	307.90776	0.35473787	1.8829E-05	7.347E-08	25.9205445	81.7794362	1.0208351	0.2737554	15939	13383	0.6651	308.98	312.882	
50	323	39.95619426	316.95943	0.36345468	1.0071E-05	7.4230E-08	25.834846	80.8622083	0.9960801	0.27186309	15774	13353	0.67	318.22	318.278	
50	323	45.3718478	318.27848	0.36660046	1.0028E-05	7.4242E-08	25.788071	80.518988	0.97875445	0.269822059	15533	13320	0.6670	318.471	318.471	
50	323	46.4715433	318.47153	0.36786601	1.0013E-05	7.4252E-08	25.752575	80.357615	0.97457204	0.26844208	15333	13312	0.671	318.61	318.627	
50	323	46.9427066	318.627066	0.37024246	1.0010E-05	7.4257E-08	25.7322845	80.188879	0.9690632	0.26728798	15148	13302	0.6693	320.92	320.922	
50	323	47.8223222	320.922322	0.37306411	1.0044E-05	7.441E-08	25.71923	80.033053	0.96529565	0.26623003	14444	1326	0.672	321.6	321.607	
50	323	48.8997423	321.607423	0.37786237	1.0478E-05	7.56E-08	25.7084287	79.978411	0.9620492	0.265184403	14241	1320	0.6777	322.01	322.015	
50	323	49.0502966	322.015066	0.37816234	1.0590E-05	7.558E-08	25.7193055	79.9325516	0.9482297	0.26445668	14045	1337	0.6781	322.38	322.356	
50	323	49.3946521	322.356452	0.37926652	1.0632E-05	7.563E-08	25.69757E	79.895491	0.9480891	0.26367473	13392	13365	0.6785	322.63	322.634	
50	323	49.5613707	322.63707	0.37988688	1.052E-05	7.5662E-08	25.6846075	79.875	0.9487837	0.26337167	13383	13383	0.6787	322.74	322.708	
50	323	49.70284307	322.708431	0.38002601	1.0519E-05	7.5691E-08	25.6922983	79.848424	0.9495368	0.26318762	13377	13381	0.6788	322.79	322.788	
50	323	49.7879838	322.787864	0.38048557	1.053E-05	7.5697E-08	25.6912374	79.855076	0.94945455	0.263084783	13372	13381	0.679	322.83	322.804	
50	323	49.832078	322.832078	0.38083746	1.0539E-05	7.5705E-08	25.690394	79.8452981	0.9494816	0.263003988	13367	1338	0.6791	322.87	322.872	
50	323	49.8397848	322.807845	0.38097767	1.0547E-05	7.57104E-08	25.6898882	79.8440648	0.9494681	0.26302538	13368	1338	0.6792	322.87	322.837	
50	323	49.8398584	322.808958	0.38098244	1.0542E-05	7.57175E-08	25.6898804	79.8437677	0.94945484	0.26300541	13366	13378	0.6792	322.87	322.872	

Tabel G. 5 Perhitungan teoritis perpindahan massa

Waktu Perpetegan	Massa Batubara	Luas Permukaan Batubara	Temperatur Film	Thermal Conductivity Uudara	Mass Diffusivity Air pada Uudara (Dab)	Thermal Diffusivity Uudara	Lewis Number	Massa Transfer Coefficient	Drying Rate	AMC	MOISTURE CONTENT
min	g	m ²	K	W/mK	m ² /s	m ² /s	no	m/s	kg/s	g/min	%
0	300	0.27272727	315	0.36061939	0.00030675	0.00024202	0.0604387	0.06553025	0.0002	11544	3.84
0	289	0.28272727	315.40358	0.367438524	0.000306875	2.47867E-05	0.082389	0.064462459	0.0002	11773	3.7299
1	289	0.25272727	317.97907	0.3749164	0.000306875	2.5490E-05	0.083259	0.063997441	0.0001	86723	3.195
3	287	0.24272727	318.93521	0.374652944	0.000306875	2.5498E-05	0.0844407	0.063993386	0.0001	85797	2.4532
4	256	0.23272727	320.75552	0.37658647	0.000306875	2.55689E-05	0.0849167	0.063328096	8E-05	47208	1.8441
5	245	0.22272727	321.47853	0.37785998	0.000306875	2.56778E-05	0.0853438	0.06319881	5E-05	3246	1.323767
6	234	0.21272727	321.98678	0.37878341	0.000306875	2.575E-05	0.085587	0.063033963	4E-05	2.6	0.9281
7	223	0.20272727	322.259873	0.37927988	0.000306875	2.58004E-05	0.086755	0.062943441	2E-05	13653	0.68777
8	212	0.19272727	322.254593	0.379884278	0.000306875	2.58333E-05	0.0868821	0.0628682E-05	E-05	0.8753	0.4079
9	201	0.18272727	322.678228	0.38025774	0.000306875	2.58854E-05	0.0869373	0.06281927	9E-06	0.2598	0.2784
10	190	0.17272727	322.71845	0.380457094	0.000306875	2.597E-05	0.086982	0.062776623	6E-06	0.3548	0.1867
11	179	0.16272727	322.85822	0.38061991	0.000306875	2.588E-05	0.0860227	0.0626763841	4E-06	0.2344	0.14990146
12	168	0.15272727	322.899399	0.38072029	0.000306875	2.5889E-05	0.0860461	0.062744668	2E-06	0.198	0.0832
13	157	0.14272727	322.93688	0.380792484	0.000306875	2.58939E-05	0.086062	0.062719375	E-06	0.087	0.0654
14	146	0.13272727	322.96368	0.38084194	0.000306875	2.5897E-05	0.0860727	0.062671389	9E-07	0.0538	0.0368
15	135	0.12272727	322.988492	0.38087472	0.000306875	2.58993E-05	0.0860801	0.0626226647	6E-07	0.033	0.0245

Tabel G. 6 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENDINGIN	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	2.88624526	50
1	29.98621398	35.41825945	3.608726743	42.18669294
2	26.3795856	38.34929749	3.509381146	43.96115602
3	23.70599151	40.77930881	3.331515851	45.9119279
4	21.51099097	42.16955052	3.242035356	47.06215891
5	19.84208393	43.52517773	3.150822466	48.10576389
6	18.53372455	44.57055664	3.090202063	48.72068811
7	17.55585205	45.37562389	3.036688871	49.14729601
8	16.80693382	45.83661885	3.000338041	49.41142922
9	16.24929538	46.27831907	2.970561594	49.57024351
10	15.80960965	46.63428113	2.952356121	49.65952785
11	15.47116891	46.88093397	2.936909245	49.73549349
12	15.21567422	47.06654978	2.924362922	49.80093011
13	15.02994163	47.23601059	2.913884206	49.84368227
14	14.8894618	47.35833557	2.907111295	49.88286089
15	14.78710734	47.43373736	2.901427024	49.91258148

H. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-B dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 11 m/s

Tabel H. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :	
Perforated Plate Type	B
Pore Diameter	0.005 m
No. of Pore	324 pcs
Pipe Diameter	0.085 m
Coal Mass	300 gram
Initial MC	40 %
Coal Dry Mass	285.7142857 gram
Coal Temperature	27 C
	300 K
Air Mass Flow Rate	0.339114286 kg/s
Air Flow Temperature	50 C
	323 K
Relative Humidity	17 %
Air Velocity Inlet	11 m/s
Air Velocity at Pore	9.811728395 m/s

Tabel H. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)				
AIR	Density	ρ	1.084856	kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05	N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378	
	Thermal Conductivity	k	0.028002	W/m.K
	Alfa	α	0.000025904	m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800	J/kg
Reynold Number		Re	2178.354703	
			LAMINAR FLOW	

Tabel H. 3 *Properties* batubara

BATUBARA			
Diameter 1butir batubara	D	4	mm
		0.004	m
Volume 1Butir Batubara	V	3.35238E-08	m ³
Luas Permukaan 1butir batubara	As	5.02857E-05	m ²
Density Batubara	ρ	1650	kg/m ³
Massa 1butir batubara	m	5.53143E-05	kg

Tabel H. 4 Perhitungan teoritis perpindahan panas secara transient

CALCULATION														
AIR TEMPERATURE		COAL TEMPERATURE		Thermal Conductivity	MU SOLID TEMPERATURE	COAL THERMAL DIFFUSIVITY	HEISSAT NUMBER	CONVECTION COEFFICIENT	Biot Number	FOURIER NUMBER	Table 5.1		Next Coal Temp	
t	K	t	K	W/m.K	N/m ²	m ² /s		W/m ² K			Fo	Bi	Core	Surface
50	323	27	303	0.34966228	0.0001818	7.2286E-08	27.342023	91.458333	12.84329	1.077181E2	16005	13.268	0.0176	308.134
50	323	35.28444824	308.3344882	0.3592596	0.0001818	7.35408E-08	27.288488	90.475544	107727301	1.2777779E	16005	13.463	0.0174	310.506
50	323	40.0660799	318.506079	0.36472265	1.00077E-05	7.419E-08	27.270063	90.008078	104224655	1.27866939	16001	13.421	0.0129	318.820
50	323	43.9166976	318.920988	0.369773843	1.00285E-05	7.48035E-08	27.270064	90.020496	102922661	1.28019191	15999	13.395	0.0161	318.032
50	323	45.0338201	318.933820	0.37348674	1.0038E-05	7.5000E-08	27.043442	90.320337	101687303	1.28170541	15988	13.379	0.0162	310.323
50	323	47.2224288	320.322428	0.37827987	1.00498E-05	7.53082E-08	27.029381	90.1754532	10069400	1.283480701	15986	13.368	0.0166	312.245
50	323	48.2246839	312.446884	0.37540348	1.00462E-05	7.5444E-08	27.029325	90.0787603	10018730	1.283290033	15762	13.362	0.01603	313.134
50	323	48.8242095	321.884209	0.37948896	1.00406E-05	7.55888E-08	27.023298	90.097076	99987008	1.28325004	15759	13.357	0.01609	322.226
50	323	49.2296058	322.229605	0.37922708	1.00392E-05	7.5615E-08	26.984201	90.073193	99965623	1.283244652	15744	13.354	0.0161	322.495
50	323	49.4905459	322.490545	0.37890818	1.00378E-05	7.5651E-08	26.983039	90.049734	99949871	1.283238242	15732	13.352	0.0161	322.869
50	323	49.6520203	322.652020	0.38116549	1.00370E-05	7.5671E-08	26.981757	90.0274901	99938423	1.283231854	15724	13.351	0.0161	322.779
50	323	49.7889198	322.788919	0.380448377	1.00358E-05	7.5694E-08	26.985993	90.004482	99932522	1.283225235	15718	13.349	0.0162	322.852
50	323	49.8522039	322.852204	0.38091966	1.00350E-05	7.57025E-08	26.984654	90.0074006	99926437	1.283218491	15716	13.348	0.0162	322.902
50	323	49.9019102	322.902907	0.38072644	1.00341E-05	7.57107E-08	26.984105	90.002206	99920348	1.283212262	15716	13.348	0.0162	322.952
50	323	49.9323274	322.932327	0.38088411	1.00332E-05	7.57176E-08	26.983841	90.0087205	9991490	1.283206162	15711	13.344	0.01623	322.971
50	323	49.9571912	322.957191	0.38084938	1.00324E-05	7.57208E-08	26.9832741	90.006818	99917451	1.283200326	1571	13.347	0.01623	322.978

Tabel H. 5 Perhitungan teoritis perpindahan massa

Waktu Pengerinan	Massa Batubara	Luas Permukaan Batubara	Temperatur Film	Thermal Conductivity Udara	Mass Diffusivity Air pada Udara	Thermal Diffusivity Udara	Lewis Number	Mass Transfer Coefficient	Drying Rate	ΔMC	MOISTURE CONTENT
min	gr	m ²	K	W/m.K	m ² /s	m ² /s		gr/m ² s	gr/min	%	%
0	303	0.27272727	3115	0.326901339	0.00000875	0.00024202	0.0004387	0.068945683	0.0002	12.58	0.4241
1	288	0.26272727	3.65627422	0.36781819	0.00000875	2.4848E-05	0.06244866	0.067828269	0.0002	11.34	3.9149
2	278	0.25272727	318.252039	0.372289553	0.00000875	2.52014E-05	0.0837605	0.067182739	0.0001	8.9218	3.2092
3	267	0.24272727	318.900593	0.375191642	0.00000875	2.54435E-05	0.0845719	0.067309778	0.0001	6.6761	2.4761
4	256	0.23272727	320.960581	0.378198204	0.00000875	2.5601E-05	0.0850963	0.06644195	8E-05	4.4944	1.9025
5	245	0.22272727	321.666182	0.37889304	0.00000875	2.57059E-05	0.0854372	0.066286403	5E-05	3.077	1.2559
6	234	0.21272727	322.177344	0.378978095	0.00000875	2.57734E-05	0.0856614	0.066172333	3E-05	1.9838	0.8477
7	223	0.20272727	322.417195	0.378942034	0.00000875	2.58177E-05	0.0855889	0.066072284	2E-05	1.2029	0.5294
8	212	0.19272727	322.619803	0.380693964	0.00000875	2.5847E-05	0.0859061	0.06605735	1E-05	0.5171	0.3662
9	201	0.18272727	322.742573	0.38037568	0.00000875	2.58663E-05	0.0859703	0.06606898	8E-06	0.4684	0.2335
10	190	0.17272727	322.831946	0.380566385	0.00000875	2.58791E-05	0.0860027	0.066032873	5E-06	0.2895	0.1524
11	179	0.16272727	322.888448	0.380869769	0.00000875	2.58915E-05	0.0860007	0.066018683	3E-06	0.1774	0.0991
12	168	0.15272727	322.926477	0.380780993	0.00000875	2.58931E-05	0.0860592	0.066090227	2E-06	0.1081	0.0643
13	157	0.14272727	322.951999	0.380835883	0.00000875	2.58968E-05	0.0860715	0.066082867	1E-06	0.0665	0.0419
14	146	0.13272727	322.967679	0.380872816	0.00000875	2.58992E-05	0.0860796	0.066088734	7E-07	0.0394	0.027
15	135	0.12272727	322.978564	0.38089727	0.00000875	2.58998E-05	0.0860835	0.066083827	4E-07	0.0288	0.0175

Tabel A. 8 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENDINGIN	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	3.174869786	50
1	29.79318714	35.6883616	3.932096101	41.87943311
2	25.9974971	38.65970436	3.82935203	43.66992524
3	23.22280017	41.11061874	3.6351446	45.67594563
4	20.99941802	42.50807619	3.533457229	46.87354471
5	19.36171284	43.84295613	3.433126545	47.8608452
6	18.12033265	44.85019826	3.367422407	48.50838454
7	17.2228542	45.60486338	3.312351098	48.99279612
8	16.54858756	46.02069796	3.277231139	49.28830333
9	16.05442893	46.4172498	3.249382865	49.48528512
10	15.66458018	46.73833843	3.233363723	49.590411
11	15.36587259	46.95936513	3.219513935	49.68602919
12	15.14335114	47.12460185	3.208027988	49.76567866
13	14.97513073	47.27716477	3.199880743	49.81784264
14	14.8515236	47.38756272	3.19321674	49.86441874
15	14.75988753	47.45583143	3.188454475	49.90022884

I. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-B dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 12 m/s

Tabel I. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :		
Perforated Plate Type	B	
Pore Diameter	0.005	m
No. of Pore	324	pcs
Pipe Diameter	0.085	m
Coal Mass	300	gram
Initial MC	40	%
Coal Dry Mass	285.7142857	gram
Coal Temperature	27	C
	300	K
Air Mass Flow Rate	0.339114286	kg/s
Air Flow Temperature	50	C
	323	K
Relative Humidity	17	%
Air Velocity Inlet	12	m/s
Air Velocity at Pore	10.7037037	m/s

Tabel I. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1.084856 kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378
	Thermal Conductivity	k	0.028002 W/m.K
	Alfa	α	0.000025904 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800 J/kg
Reynold Number		Re	2376.386949
			TURBULENT FLOW

Tabel I. 3 Properties batubara

BATUBARA			
Diameter 1butir batubara	D	4	mm
Volume 1Butir Batubara	V	3.35238E-08	m ³
Luas Permukaan 1butir batubara	As	5.02857E-05	m ²
Density Batubara	ρ	1650	kg/m ³
Massa 1 butir batubara	m	5.53143E-05	kg

Tabel I. 4 Perhitungan teoritis perpindahan panas secara transient

CALCULATION																			
AIR TEMPERATURE		COAL TEMPERATURE		THERMAL CONDUCTIVITY		NUJ SOLID TEMPERATURE		COAL THERMAL DIFFUSIVITY		CONVECTION COEFFICIENT		BIOT NUMBER		FOURIER NUMBER		Table 5.1		New Coal Temp	
°C	K	°C	K	W/mK	m ² /s	m ² /s	m ² /s	W/mK	m ² /s	W/m ² °C							°C	°C	
50	323	27	300	0.34066235	0.0001849	7.2295E-08	28.0545181	200.241069	1.95039	0.2718832	17039	13811	0.659	0.65	0.38751	308.754			
50	323	307.69191	308.761981	0.359843682	1.8971E-05	7.36026E-08	28.4473737	193.963237	1.96997E	0.27100565	16835	13511	0.654	0.634	0.39437	314.957			
50	323	1.07549307	314.074331	0.364698448	1.9219E-05	7.4388E-08	28.371555	168.619704	1.9884799	0.270955235	16408	13486	0.634	0.634	0.37244	317.234			
50	323	44.2493456	317.239764	0.3761903	1.92758E-05	7.4875E-08	28.38466	168.243432	1.9889792	0.270791894	16273	13459	0.630	0.630	0.36362	318.362			
50	323	46.3434159	318.344418	0.37419165	1.9376E-05	7.5362E-08	28.3994205	169.079601	1.9963709	0.27062527	16101	13443	0.642	0.642	0.36462	320.693			
50	323	47.8939445	320.693945	0.37644171	1.94348E-05	7.5772E-08	28.3644787	167.895483	1.9578181	0.270494999	16109	13432	0.643	0.643	0.35749	321.695			
50	323	48.8466205	321.696202	0.377819424	1.94743E-05	7.6202E-08	28.2975901	167.702064	1.9471980	0.270317771	16068	13426	0.641	0.641	0.35727	322.071			
50	323	49.0270873	322.070887	0.37862941	1.948997E-05	7.6582E-08	28.3425967	167.752915	1.9482731	0.270243338	16086	13422	0.644	0.644	0.35278	322.378			
50	323	49.3320189	322.378219	0.379424919	1.9518E-05	7.69338E-08	28.237192	167.878759	1.9448947	0.270189319	16099	13419	0.641	0.641	0.35259	322.664			
50	323	49.5563002	322.663006	0.38004666	1.95260E-05	7.72669E-08	28.2327983	167.849446	1.9449474	0.270139599	16059	13417	0.644	0.644	0.35239	322.789			
50	323	49.7386228	322.738623	0.38071524	1.95333E-05	7.7588E-08	28.232044	167.832467	1.9397687	0.270138507	16052	13415	0.646	0.646	0.35231	322.814			
50	323	49.8819268	322.811923	0.380926203	1.95379E-05	7.79276E-08	28.228992	167.822938	1.9395794	0.270138306	16047	13414	0.646	0.646	0.35231	322.811			
50	323	49.8919757	322.819752	0.38074771	1.95450E-05	7.8277E-08	28.228992	167.816306	1.9393886	0.270138307	16044	13414	0.649	0.649	0.35227	322.807			
50	323	49.9387861	322.938786	0.38079196	1.95483E-05	7.8579E-08	28.228295	167.820844	1.9379594	0.270138195	16042	13415	0.649	0.649	0.35246	322.846			
50	323	49.95457678	322.954578	0.3804366	1.95435E-05	7.8720E-08	28.227881	167.800328	1.9374542	0.270138088	16041	13413	0.646	0.646	0.35271	322.877			
50	323	49.97093883	322.970938	0.38037907	1.95442E-05	7.87229E-08	28.2276326	167.801941	1.9372719	0.270138088	1604	13413	0.646	0.646	0.35281	322.881			

Tabel A. 9 Perhitungan teoritis perpindahan massa

Waktu Pengeringan	Massa Batubara	Luas Permukaan Batubara	Temperatur Film	Thermal Conductivity Udara	Massa Diffusivity Air pada Udara (Dab)	Thermal Diffusivity Udara	Lewis Number	Mass Transfer Coefficient	Drying Rate	AMC	MOISTURE CONTENT
min	gr	m ²	°C	W/mK	m ² /s	m ² /s		kg/s	gr/min	%	%
0	330	0.27272727	315	0.36061038	0.00030675	0.00024202	0.0804387	0.77212373	0.0002	12.886	4.2367
1	289	0.26272727	315.875686	0.36687422	0.000306875	2.449496E-05	0.0829199	0.77089826	0.0002	18.27	4.0925
2	278	0.25272727	318.508747	0.37232145	0.000306875	2.52393E-05	0.0838863	0.770182488	0.0002	9.368	3.2866
3	267	0.24272727	320.741897	0.375589897	0.000306875	2.548E-05	0.0848987	0.669743625	0.0001	8.028	2.4767
4	256	0.23272727	321.171203	0.377349303	0.000306875	2.56335E-05	0.085196	0.66941374	7E-05	4.4868	1.7528
5	245	0.22272727	321.678447	0.378413776	0.000306875	2.57302E-05	0.0855181	0.66903019	5E-05	2.9005	1.1843
6	234	0.21272727	322.24476	0.37925659	0.000306875	2.57762E-05	0.0857241	0.668969796	3E-05	1.822	0.744
7	223	0.20272727	322.819534	0.379887538	0.000306875	2.5833E-05	0.0859583	0.668905942	2E-05	1.0534	0.4789
8	212	0.19272727	322.886401	0.38024449	0.000306875	2.58576E-05	0.0859413	0.66902508	1E-05	0.7002	0.3008
9	201	0.18272727	322.979805	0.380492891	0.000306875	2.5874E-05	0.085996	0.668989587	7E-06	0.3926	0.1563
10	190	0.17272727	322.899426	0.380653273	0.000306875	2.58847E-05	0.0860313	0.668969786	4E-06	0.2367	0.041
11	179	0.16272727	322.85686	0.380716727	0.000306875	2.58918E-05	0.0860541	0.668944527	2E-06	0.1407	0.0786
12	168	0.15272727	322.845559	0.380623496	0.000306875	2.58959E-05	0.0860683	0.66893461	1E-06	0.0635	0.0497
13	157	0.14272727	322.864838	0.38066603	0.000306875	2.58988E-05	0.0860783	0.668927289	8E-07	0.0492	0.0314
14	146	0.13272727	322.877288	0.38069444	0.000306875	2.59000E-05	0.0860843	0.668922624	5E-07	0.0289	0.198
15	135	0.12272727	322.863263	0.38091848	0.000306875	2.59019E-05	0.0860883	0.668920184	3E-07	0.0188	0.0482

Tabel A. 10 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	3.463485981	50
1	29.60349131	35.93227828	4.254857546	41.51898394
2	25.57787414	38.93459073	4.156239481	43.33035576
3	22.70095838	41.42579996	3.938633791	45.4009601
4	20.50273014	42.8434085	3.816097775	46.65382119
5	18.92306334	44.1375728	3.71130593	47.62249717
6	17.78435771	45.09749926	3.639305495	48.31330952
7	16.94594841	45.78834857	3.591464765	48.77554626
8	16.33479204	46.16507561	3.555993649	49.12875155
9	15.89463263	46.52431812	3.529703516	49.36778121
10	15.5516139	46.8171341	3.514862544	49.50844678
11	15.28836255	47.01744169	3.502779918	49.62664208
12	15.08456955	47.16717086	3.493824853	49.71234435
13	14.93422698	47.3070188	3.485822019	49.78536626
14	14.82021299	47.40972258	3.480399303	49.83783758
15	14.74066595	47.47121793	3.475272874	49.88800288

J. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-B dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 13 m/s

Tabel J. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :		
Perforated Plate Type	B	
Pore Diameter	0.005	m
No. of Pore	324	pcs
Pipe Diameter	0.085	m
Coal Mass	300	gram
Initial MC	40	%
Coal Dry Mass	285.7142857	gram
Coal Temperature	27	C
	300	K
Air Mass Flow Rate	0.339114286	kg/s
Air Flow Temperature	50	C
	323	K
Relative Humidity	17	%
Air Velocity Inlet	13	m/s
Air Velocity at Pore	11.59567901	m/s

Tabel J. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)			
AIR	Density	ρ	1084856 kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05 N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378
	Thermal Conductivity	k	0.028002 W/m.K
	Alfa	α	0.000025904 m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800 J/kg

Reynold Number	Re	2574.419194
		TURBULENT FLOW

Tabel J. 3 *Properties* batubara

BATUBARA			
Diameter 1butir batubara	D	4	mm
		0.004	m
Volume 1Butir Batubara	V	3.35238E- 08	m3
Luas Permukaan 1butir batubara	As	5.02857E- 05	m2
Density Batubara	ρ	1650	kg/m3
Massa 1butir batubara	m	5.53143E- 05	kg

Tabel J. 4 Perhitungan teoritis perpindahan panas secara transient

CALCULATION												Next Coal Temp.									
AIR TEMPERATURE		COAL TEMPERATURE		THERMAL CONDUCTIVITY		NU SOLID TEMPERATURE		COAL THERMAL DIFFUSIVITY		CONVECTION COEFFICIENT		BIOT NUMBER		FOURER NUMBER		Table 5.1		Core		Surface	
t_c	t_w	t_c	t_w	k	k_w	t_c	t_w	α_c	α_w	h	Bi	$Four$	ϕ	C_1	ψ	t_c	t_w	t_c	t_w	t_c	t_w
50	303	27	300	0.346996235	0.0000848	7.2292E- 09	29.6225220	208.725734	1.225643	0.2719832	17401	1.6853	0.0021			300.63	309.528	300.63	309.528	300.63	309.528
50	303	36.5929634	300.626163	0.366789608	1.8922E- 05	7.3692E- 08	29.6923050	207.664394	1.6649008	0.276235430	16961	1.9565	0.0181			316.498	316.498	316.498	316.498	316.498	316.498
50	303	414.6996908	314.466713	0.366789608	1.9342E- 05	7.44945E- 08	29.705272	207.698709	1.1376371	0.279222747	16723	1.9464	0.0206			317.723	317.723	317.723	317.723	317.723	317.723
50	303	44.72029743	317.7207748	0.378787029	1.9398E- 05	7.49403E- 08	29.5959503	206.6294734	1.1377703	0.282628936	16584	1.9321	0.0242			318.706	318.706	318.706	318.706	318.706	318.706
50	303	46.708708	318.708708	0.378484733	1.9391E- 05	7.52962E- 08	29.4265013	206.3385711	1.0039201	0.283265277	16502	1.9304	0.0263			320.007	320.007	320.007	320.007	320.007	320.007
50	303	47.53692278	320.3369228	0.378934599	1.94482E- 05	7.54497E- 08	29.4623448	206.2407445	1.084395	0.283282855	16481	1.9484	0.0277			321.005	321.005	321.005	321.005	321.005	321.005
50	303	48.76308184	321.7052815	0.377045259	1.94445E- 05	7.55143E- 08	29.4100623	206.163247	1.0000294	0.283252396	1642	1.9489	0.0285			322.162	322.162	322.162	322.162	322.162	322.162
50	303	49.985772	323.981972	0.379595008	1.94907E- 05	7.56056E- 08	29.441088	206.104309	1.0879631	0.28322272	164	1.9484	0.029			322.4881	322.4881	322.4881	322.4881	322.4881	322.4881
50	303	49.8895029	322.488901	0.378000771	1.9524E- 05	7.5657E- 08	29.4436591	206.060322	1.089442	0.28307074	16384	1.9481	0.0296			322.578	322.578	322.578	322.578	322.578	322.578
50	303	49.8777718	322.8777718	0.38622794	1.95304E- 05	7.56925E- 08	29.432036	206.047478	1.0898801	0.28279787	16395	1.9479	0.0298			322.797	322.797	322.797	322.797	322.797	322.797
50	303	49.73796885	322.7379688	0.38499482	1.9538E- 05	7.5697E- 08	29.4312375	206.033781	1.0898847	0.283083838	16369	1.9478	0.03			322.872	322.872	322.872	322.872	322.872	322.872
50	303	49.8724832	322.8724832	0.386660082	1.95388E- 05	7.57085E- 08	29.4269694	206.024669	1.0894603	0.2830088	16362	1.9473	0.0301			322.9882	322.9882	322.9882	322.9882	322.9882	322.9882
50	303	49.8945379	322.8945379	0.386700529	1.9547E- 05	7.5743E- 08	29.426211	206.019854	1.0815383	0.2830224	16363	1.9473	0.0301			322.949	322.949	322.949	322.949	322.949	322.949
50	303	49.8843432	322.8843432	0.386897937	1.95425E- 05	7.57391E- 08	29.4287367	206.016738	1.0896229	0.283046988	16381	1.9478	0.0302			322.988	322.988	322.988	322.988	322.988	322.988
50	303	49.8688431	322.8688431	0.386877204	1.9544E- 05	7.57225E- 08	29.4284205	206.0165564	1.0897945	0.283056399	16383	1.9478	0.0302			322.978	322.978	322.978	322.978	322.978	322.978
50	303	49.9784203	322.97842	0.3893905E	1.95446E- 05	7.57243E- 08	29.42821	206.019342	1.0897429	0.283066003	1636	1.9476	0.0302			322.987	322.987	322.987	322.987	322.987	322.987

Tabel J. 5 Perhitungan teoritis perpindahan massa

Waktu Pengerinan	Massa Batubara	Luas Permukaan Batubara	Temperatur Film	Thermal Conductivity Batubara	Mass Diffusivity Air pada Udara	Thermal Diffusivity Udara	Lewis Number	Mass Transfer Coefficient	Drying Rate	ΔMC	MOISTURE CONTENT
min	gr	m2	K	W/mK	m2/s	m2/s		m/s	kg/s	g/min	%
0	300	0.27272727	3115	0.36961639	0.000030875	0.00024202	0.0634387	0.07584768	0.0002	13.226	4.4983
1	289	0.28272727	31670.0748	0.368525125	0.000030875	2.48793E- 05	0.0626988	0.077385093	0.0002	12.321	4.2634
2	278	0.25272727	318.747985	0.373146231	0.000030875	2.52747E- 05	0.064004	0.0773197	0.0002	9.3025	3.3527
3	267	0.24272727	320.361487	0.375993966	0.000030875	2.55105E- 05	0.0647977	0.077262201	0.0001	6.5886	2.4965
4	256	0.23272727	321.933095	0.377655282	0.000030875	2.56963E- 05	0.0652654	0.077237885	7E- 05	4.3424	1.6963
5	245	0.22272727	323.986461	0.3787204	0.000030875	2.57515E- 05	0.0655881	0.077221224	5E- 05	2.7254	1.116
6	234	0.21272727	322.352541	0.379497576	0.000030875	2.58082E- 05	0.0657711	0.077208436	3E- 05	1.6844	0.7044
7	223	0.20272727	322.593969	0.380330493	0.000030875	2.58439E- 05	0.0658954	0.077199561	2E- 05	0.9396	0.42
8	212	0.19272727	322.744405	0.381073046	0.000030875	2.58691E- 05	0.0659897	0.077184164	1E- 05	0.5563	0.2624
9	201	0.18272727	322.838886	0.381594987	0.000030875	2.58892E- 05	0.0660463	0.077169503	5E- 06	0.3275	0.163
10	190	0.17272727	322.895835	0.38178356	0.000030875	2.58989E- 05	0.0660847	0.077163547	3E- 06	0.195	0.108
11	179	0.16272727	322.936882	0.382000549	0.000030875	2.59045E- 05	0.0660941	0.077166904	2E- 06	0.119	0.0622
12	168	0.15272727	322.959777	0.382055375	0.000030875	2.59069E- 05	0.0660797	0.077166161	1E- 06	0.0643	0.0383
13	157	0.14272727	322.974622	0.382088479	0.000030875	2.590902E- 05	0.0660831	0.077165572	6E- 07	0.037	0.0236
14	146	0.13272727	322.984007	0.382090463	0.000030875	2.59097E- 05	0.0660877	0.077165229	4E- 07	0.022	0.0145
15	135	0.12272727	322.988952	0.382092865	0.000030875	2.590925E- 05	0.0660906	0.077165036	2E- 07	0.012	0.0089

Tabel J. 6 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI					
TIPE PERFORATED PLATE		B		KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING		
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur	
	%	°C	kg/jam	°C	
0	34	27	3.752118112	50	
1	29.42921696	36.15424924	4.574859058	41.12385868	
2	25.27792516	39.20432627	4.465195885	43.10327096	
3	22.33253719	41.69237874	4.237051593	45.13086268	
4	20.09490849	43.0929004	4.109673742	46.29063242	
5	18.54860847	44.36803608	3.993675782	47.2965458	
6	17.4528025	45.28867233	3.920654049	47.9885915	
7	16.70578191	45.94459291	3.86575148	48.56278934	
8	16.16391944	46.28429805	3.833927978	48.94803153	
9	15.77542033	46.60771386	3.810455461	49.22448668	
10	15.46564112	46.87585424	3.79845407	49.3906604	
11	15.22575065	47.06039491	3.787889119	49.53787458	
12	15.04617425	47.19777042	3.778827548	49.65681327	
13	14.90803792	47.32818995	3.772627018	49.73821664	
14	14.80494941	47.4237017	3.767402367	49.80819139	
15	14.72818894	47.48284601	3.763487142	49.85945669	

K. Simulasi dan Perhitungan Teoritis Perforated Plate Type-B dengan Kecepatan Masuk Udara Pengering 14 m/s

Tabel K. 1 *Properties* perhitungan teoritis perbandingan dengan Eksperimen

DATA :		
Perforated Plate Type	B	
Pore Diameter	0.005	m
No. of Pore	324	pcs
Pipe Diameter	0.085	m
Coal Mass	300	gram
Initial MC	40	%
Coal Dry Mass	285.7142857	gram
Coal Temperature	27	C
	300	K
Air Mass Flow Rate	0.339114286	kg/s
Air Flow Temperature	50	C
	323	K
Relative Humidity	17	%
Air Velocity Inlet	14	m/s
Air Velocity at Pore	12.48765432	m/s

Tabel K. 2 *Properties* perhitungan teoritis udara pengering

Properties (T=50C)				
AIR	Density	ρ	1.084856	kg/m ³
	Niu	μ	1.95456E-05	N.s/m ²
	Prandl Number	Pr	0.70378	
	Thermal Conductivity	k	0.028002	W/m.K
	Alfa	α	0.000025904	m ² /s
H2O	Heat of Vaporization	hfg	2382800	J/kg

Reynold Number	Re	2772.45144
		TURBULENT FLOW

Tabel K. 3 *Properties* batubara

BATUBARA				
Diameter 1butir batubara	D	4	mm	
		0.004	m	
Volume 1Butir Batubara	V	3.35238E-08	m ³	
Luas Permukaan 1butir batubara	As	5.02857E-05	m ²	
Density Batubara	ρ	1650	kg/m ³	
Massa 1butir batubara	m	5.53143E-05	kg	

Tabel K. 4 Perhitungan teoritis perpindahan panas secara transient

AIR TEMPERATURE		COAL TEMPERATURE		THERMAL CONDUCTIVITY		NUSSELL NUMBER		CONVECTION COEFFICIENT		BIOT NUMBER		FOURIER NUMBER		Table 5.1		Heat Coal Temp	
K	C	K	C	W/m.k	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
50	323	27	300	0.340696235	0.00049848	7.2292E-08	310009107	27.0249602	12739007	0.2741882	17362	13362	0.5802	0.5652	300.54	300.6309	
50	323	36.03260461	300.5599516	0.307203897	189013E-05	7.57202E-08	30.6207161	2.61023911	132627166	0.274401854	17276	13056	0.5905	0.5698	318.844	318.9445	
50	323	45.9444962	318.844459	0.386626269	193645E-05	7.45033E-08	30.7309555	2.6376293	119735474	0.274475016	17026	1306	0.6053	0.6053	318.24	318.242	
50	323	45.5477781	318.547774	0.372906922	193956E-05	7.50023E-08	30.6743337	2.63789278	116426848	0.28255245	16885	1358	0.6051	0.6051	320.05	320.053	
50	323	47.0203271	320.020322	0.370566742	194544E-05	7.52844E-08	30.64154	2.6320208	116202090	0.282318844	16803	1364	0.61	0.61	321.16	321.167	
50	323	48.1847376	321.84742	0.37263696	194590E-05	7.54566E-08	30.6202697	2.63202697	115812024	0.282622378	16753	13564	0.6105	0.6105	321.88	321.888	
50	323	49.3805091	321.880529	0.371891196	194591E-05	7.55816E-08	30.608777	2.6270351	115189587	0.28305594	16724	1346	0.6154	0.6154	322.39	322.318	
50	323	49.3707682	322.370766	0.374932024	195548E-05	7.56259E-08	30.6019361	2.6224653	115022035	0.28359096	16704	13444	0.6169	0.6169	322.81	322.813	
50	323	49.5876727	322.587673	0.380020227	195238E-05	7.56644E-08	30.5987338	2.6192747	114732087	0.28473174	1669	13342	0.6164	0.6164	322.743	322.7428	
50	323	49.7270648	322.747065	0.380170663	195236E-05	7.56888E-08	30.5990889	2.6172542	114503007	0.285339452	16681	1334	0.6164	0.6164	322.824	322.8248	
50	323	49.8418951	322.841895	0.38029178	19523E-05	7.57037E-08	30.5922847	2.6154264	11424724	0.285888878	16676	13339	0.6164	0.6164	322.803	322.8028	
50	323	49.9270965	322.927096	0.380379802	19544E-05	7.57192E-08	30.5901321	2.6150305	114043044	0.286392929	16673	13338	0.6164	0.6164	322.842	322.8402	
50	323	49.9420334	322.942034	0.38081859	195428E-05	7.57348E-08	30.5905839	2.6140384	113846992	0.287043858	16671	13338	0.6164	0.6164	322.832	322.832	
50	323	49.9548488	322.954848	0.38083645	195436E-05	7.57378E-08	30.5908886	2.6146818	113643307	0.287698724	1667	13336	0.616	0.616	322.897	322.8974	
50	323	49.9730763	322.973076	0.38004854	195445E-05	7.57573E-08	30.5899423	2.6144819	113443088	0.288364436	16669	13337	0.615	0.615	322.981	322.981	
50	323	49.9890948	322.989095	0.38091411	195449E-05	7.57525E-08	30.5897321	2.6143859	113249092	0.288989051	16668	13337	0.615	0.615	322.991	322.9916	

Tabel K. 5 Perhitungan teoritis perpindahan massa

Waktu Pengeraman	Massa Batubara	Luas Permukaan Batubara	Temperatur Film	Thermal Conductivity Udara	Mass Diffusivity Air pada Udara	Thermal Diffusivity Udara	Lewis Number	Mass Transfer Coefficient	Drying Rate	ΔMC	MOISTURE CONTENT
min	gr	m ²	K	W/m.k	m ² /s	m ² /s	-	m/s	kg/s	g/min	%
0	300	0.27272727	3115	0.366040339	0.000300875	0.000024202	0.0604387	0.078165977	0.0002	11.749	4.583
1	289	0.26272727	316.269951	0.368657198	0.000300875	2.43098E-05	0.0627651	0.07876746	0.0002	11.799	4.4284
2	278	0.25272727	318.972749	0.373534559	0.000300875	2.37017E-05	0.0641143	0.07765321	0.0002	11.4743	3.4053
3	267	0.24272727	320.562089	0.378286177	0.000300875	2.35432E-05	0.0648963	0.075456369	0.0001	6.5328	2.4467
4	256	0.23272727	3215.654	0.377835792	0.000300875	2.36842E-05	0.0638652	0.075190185	7E-05	4.882	1.6349
5	245	0.22272727	322.092371	0.378184617	0.000300875	2.37697E-05	0.0638691	0.075257189	4E-05	2.5456	1.039
6	234	0.21272727	322.444018	0.37970208	0.000300875	2.3827E-05	0.0658221	0.074894706	2E-05	1.4936	0.6333
7	223	0.20272727	322.658888	0.38082758	0.000300875	2.38535E-05	0.0659278	0.07482537	1E-05	0.8222	0.3687
8	212	0.19272727	322.790644	0.38047724	0.000300875	2.3873E-05	0.0659926	0.074762309	8E-06	0.4754	0.18244
9	201	0.18272727	322.87138	0.380657642	0.000300875	2.38885E-05	0.0660323	0.074716542	5E-06	0.2725	0.1066
10	190	0.17272727	322.920848	0.380784649	0.000300875	2.38923E-05	0.0660567	0.074715666	3E-06	0.1652	0.0817
11	179	0.16272727	322.9534	0.380836557	0.000300875	2.38968E-05	0.066078	0.07470374	1E-06	0.0879	0.0491
12	168	0.15272727	322.97017	0.380878405	0.000300875	2.38994E-05	0.0660809	0.074693952	8E-07	0.0495	0.0295
13	157	0.14272727	322.98253	0.380941033	0.000300875	2.39013E-05	0.0660866	0.074689574	5E-07	0.0278	0.0177
14	146	0.13272727	322.988699	0.380919953	0.000300875	2.39023E-05	0.06609	0.074686682	3E-07	0.015	0.0105
15	135	0.12272727	322.99305	0.38092961	0.000300875	2.39032E-05	0.0660921	0.074685227	1E-07	0.0086	0.0064

Tabel K. 6 Hasil simulasi

HASIL SIMULASI				
TIPE PERFORATED PLATE		B	KECEPATAN	10 m/s
Menit	BATUBARA		UDARA PENGERING	
	Moisture Content	Temperatur	Massa Alir Air	Temperatur
	%	°C	kg/jam	°C
0	34	27	4.040743364	50
1	29.25207609	36.35945359	4.895369667	40.66090616
2	24.97420146	39.45409209	4.774200957	42.75731663
3	21.96006627	41.940989	4.535420701	44.80571646
4	19.68303618	43.32749087	4.403183681	45.94810723
5	18.2042744	44.58573679	4.270761778	46.95239059
6	17.1897021	45.46066431	4.196224337	47.65737519
7	16.50714239	46.06925334	4.144282888	48.27146743
8	16.02377982	46.37768933	4.113565606	48.7099527
9	15.67406736	46.67243646	4.093175534	49.03516325
10	15.39693024	46.92055871	4.082149049	49.2430435
11	15.17938856	47.09286695	4.073155115	49.4234904
12	15.01512249	47.22091792	4.065164288	49.56647709
13	14.88753125	47.34378603	4.059680795	49.68163081
14	14.79165924	47.43436222	4.054954789	49.76039758
15	14.71921905	47.4909757	4.051471117	49.8273199

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Teofilus Evan Rusel lahir pada 07 September 1999 di Kota Pontianak, Kalimantan Barat. Menempuh pendidikan dari SDS Gembala Baik I Pontianak, SMPN 10 Pontianak, SMAN 3 Pontianak, dan pendidikan Sarjana di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Sebelum perkuliahan, penulis aktif dalam dunia paduan suara. Penulis merupakan Alumni Gita

Bahana Nusantara Tahun 2015, juga pernah meraih Medali Emas pada Pesta Paduan Suara Gerejawi Nasional 2015, Ambon, Maluku. Selama masa perkuliahan di ITS, penulis aktif di beberapa kegiatan maupun organisasi. Pada tahun kedua, penulis menjadi staf Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HMM 2017/2018, OC Acara pada POROS 2017, serta SC pada kegiatan Latihan Alam PSM ITS. Pada tahun ketiga menjadi Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HMM 2018/2019. Pada tahun keempat penulis aktif dalam tim konsultan pada bidang pembangkit dibawah naungan Prof. Prabowo, yang telah menyelesaikan berbagai pekerjaan yang berkaitan dengan pembangkitan listrik di Indonesia. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia (TMMIN) atau yang lebih dikenal dengan perusahaan manufaktur kendaraan roda 4 pada 2019, dimana penulis ditempatkan pada divisi khusus dalam pekerjaan pemindahan *plant* sebagai *drafter*.

Mengenai saran dan kritik terkait tugas akhir, dapat menghubungi penulis melalui:

Email : teofilusrusel@gmail.com

No. Telp : 0812 1168 2366