



UNIVERSITAS INDONESIA

**EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD PENDING SEMPROT
DARI AIR DAN AIR GULA 2%**

SKRIPSI

**ANDI CAMALATA
0806368396**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD PENGERING SEMPROT
DARI AIR DAN AIR GULA 2%**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

**ANDI CAMALATA
0806368396**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2010**

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**



Nama : Andi Camalata
NPM : 0806368396
Tanda Tangan :
Tanggal : 29 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Andi Camalata
NPM : 0806368396
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Eksperimen Dan Simulasi CFD Pengering Semprot Dari
Air dan Air Gula 2%

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T. ()

Penguji : Ir. Imansyah Ibnu Hakim, M.Eng ()

Penguji : Dr. Ir. Warjito, M.Eng ()

Penguji : Ir. Rusdi Malin, M.ME ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmatnya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

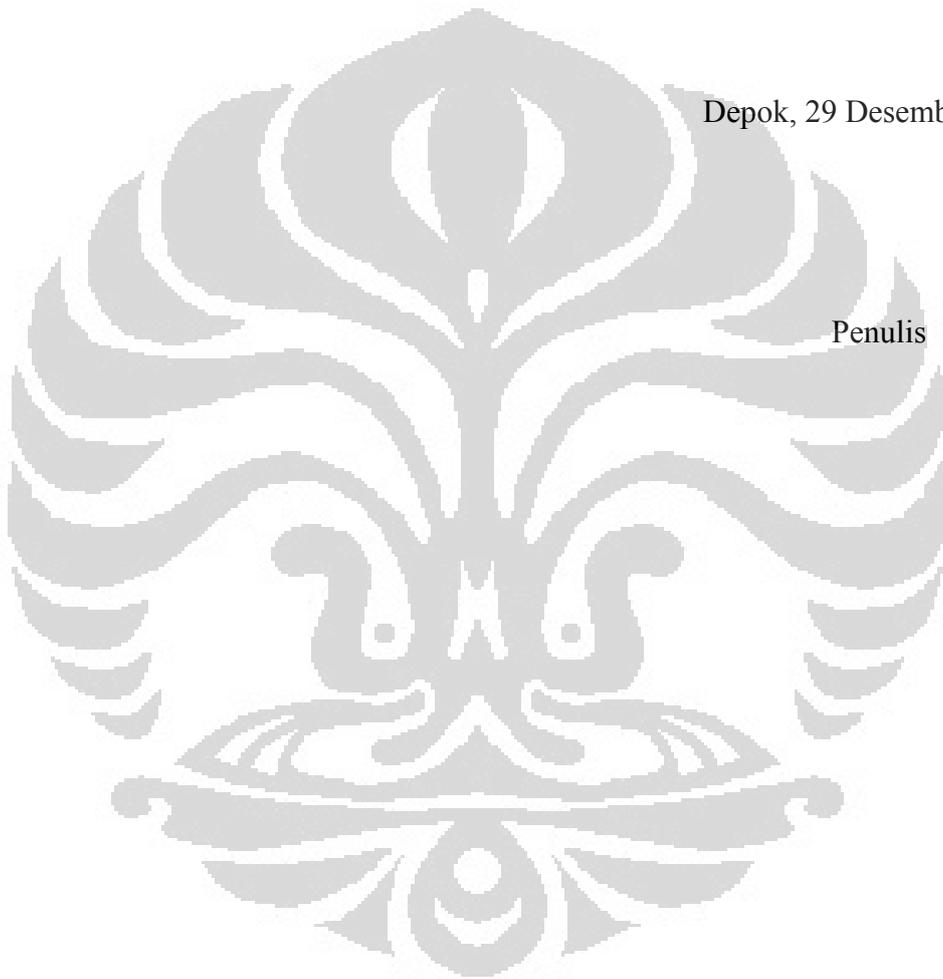
1. Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T., selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi arahan, bimbingan dan persetujuan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik;
2. Seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan dan mengajarkan ilmunya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan bermacam ilmu yang telah didapat;
3. Seluruh staf karyawan Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah membantu dalam proses penelitian pengering sempot;
4. Papa penulis Djaliman.N dan mama penulis Yulinas, M.Pd terima kasih kalian telah mendukung anakmu ini. “papa dan mama, skripsi ini kupersembahkan untuk kalian”;
5. Abang, Ayuk, dan Adik penulis tercinta. Abang M.Zein, Ayuk Murniarti, Adek Siska Sasmita, dan Mas M.Yusuf Arifin yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
6. Hery Prabowo dan Arief Muslim saudara seperjuangan dalam mengerjakan penelitian ini. “Jazakallahu khairan”.
7. Mas Suki Hananto, yang telah memberikan dukungan moral dan do’a;
8. Saudara-saudaraku penghuni Armin Kos terutama Afandi, Kisna, Andianto, Wawan, Marjo yang telah mendukung seluruh perjuangan akhir untuk menyelesaikan skripsi ini;

9. Teman-teman seperjuangan PPSE Teknik Mesin UI angkatan 2008 atas doa dan bantuannya.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 29 Desember 2010

Penulis



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andi Camalata
NPM : 0806368396
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: **EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD PENERING SEMPROT DARI AIR DAN AIR GULA 2%**, beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 29 Desember 2010

Yang menyatakan,

(Andi Camalata)

ABSTRAK

Nama : Andi Camalata
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Eksperimen Dan Simulasi CFD Pengering Semprot Dari Air dan Air Gula 2%

Indonesia memiliki hasil alam yang sangat banyak, yang pada pengolahannya sering membutuhkan proses pengeringan dan diantaranya menggunakan pengering semprot (*spray dryer*). Kelebihan pengering jenis ini terutama adalah untuk material yang sensitif terhadap panas. Laju perpindahan panas dan perpindahan massa untuk suatu tetesan yang bergerak di dalam pengering semprot adalah sangat tinggi. Jadi karena laju penguapan sangat tinggi maka droplet terjaga pada temperatur rendah. Namun pengering jenis ini umumnya mempunyai kapasitas yang besar sehingga untuk kapasitas kecil masih banyak kendala. Sedangkan kapasitas yang kecil ini banyak dibutuhkan baik untuk industri farmasi maupun untuk industri sari buah-buahan dalam bentuk serbuk. Selain itu *spray dryer* dengan kapasitas kecil dibutuhkan terutama untuk industri mikro bahkan industri rumahan. Penelitian ini bermaksud melakukan eksperimen dan mengetahui karakteristik bahan dari pengujian dengan *spray dryer* (kapasitas kecil ± 5 kg larutan tiap jam). Eksperimen dilakukan dengan parameter yang akan divariasikan pada alat ini meliputi laju aliran udara pengering, tekanan udara kompressor dan temperatur udara pengering.

Hasil dari eksperimen dan simulasi CFD pada pengering semprot kapasitas kecil ini adalah diperoleh antara data eksperimen dengan simulasi didapat laju penguapan yang hampir sama. Dimana semakin tinggi suhu udara masuk ke ruang pengering maka laju penguapan semakin kecil. Untuk pengujian, bahan yang diuji adalah air dan air dengan kandungan gula 2 %.

Kata kunci:

Pengering Semprot, Laju Penguapan, Simulasi CFD, Kinerja, Pemanas Listrik

ABSTRACT

Name : Andi Camalata
Program of Study : Mechanical Engineering
Thesis Title : Experiment and CFD Simulation of Spray Dryer for Water and 2 % Glucose in Water.

Indonesia has a natural outcome very much, which in its processing and drying process often requires them to use a spray dryer. The advantages of this type of dryer are mainly for heat-sensitive material. The rate of heat transfer and mass transfer for a droplet moving in a spray dryer is very high. So because the evaporation rate is very high then the droplet was maintained at low temperature. However, this type of dryer generally has a large capacity so that for small that for small capacity are still many obstacles. While the capacity of those small much-needed goods for the pharmaceutical industry as well as for the fruit juice industry in the form of powder. Also spray dryer with a small capacity needs, especially for micro industries and even a cottage industry. This study intends to conduct experiments and investigate the characteristics of the test material with a spray dryer (small capacity \pm 5 kg of solution per hour). Experiments carried out with the parameters to be varied in this include the drying air flow rate, air pressure and temperature of drying air compressor. Result from experiment and CFD simulations on small capacity dryers are obtains between experimental data obtained by simulating the evaporation rate is almost the same. Where the higher the air temperature into the drying chamber, the smaller the evaporation rate. For testing, the tested materials are water and water with sugar content of 2%.

Keywords:

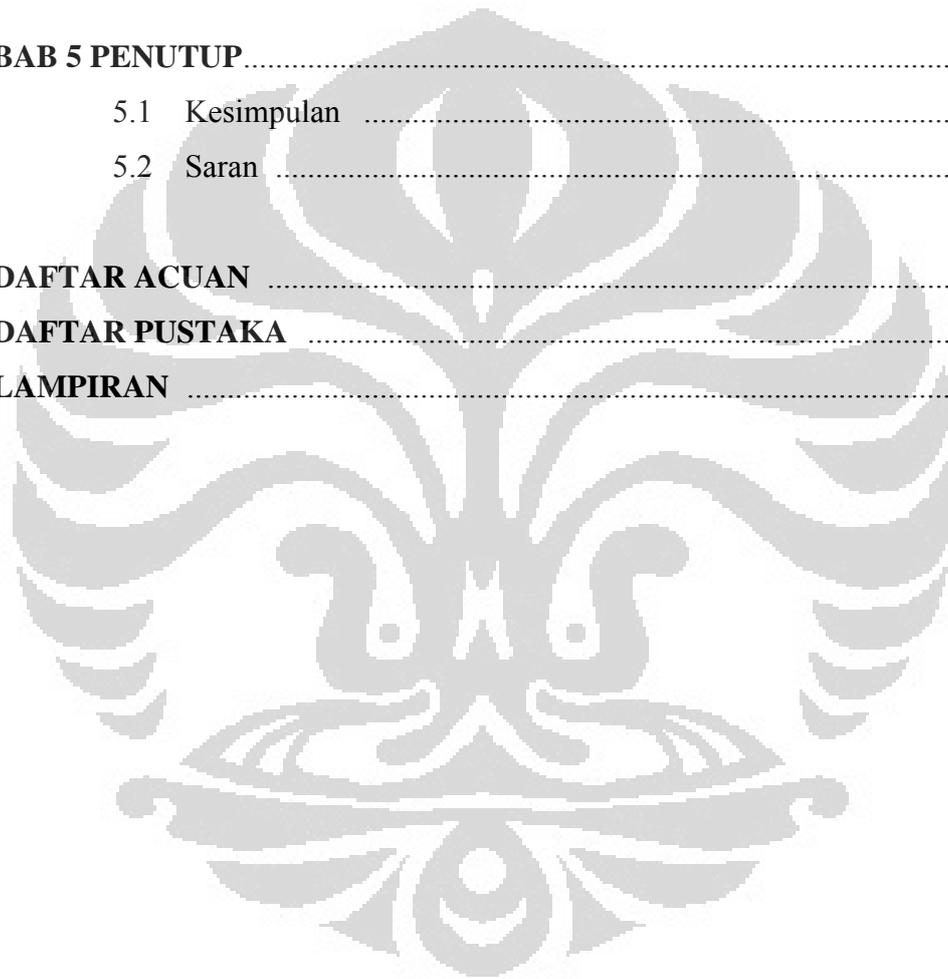
Spray Drying, Evaporation Rate, CFD Simulation, Performance, Electric Heaters

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GRAFIK.....	xvi
DAFTAR NOTASI	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 DASAR TEORI.....	5
2.1 Pengertian Pengeringan	5
2.2 Prinsip Dasar Pengeringan	5
2.3 Laju Pengeringan	7
2.4 Karakteristik Hidratasi (Penguapan Air)	9
2.4.1 Kadar Air.....	9
2.4.2 Aktivitas Air	11

2.4.3 Diagram Psikrometrik	12
2.4.4 Kurva Sorpsi Isotermik	16
2.5 Proses Pengeringan	17
2.6 Pengereng Semprot	19
2.6.1 Prinsip <i>Spray Drying</i>	22
2.6.2 Komponen-Komponen <i>Spray Dryer</i>	23
2.7 <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD)	32
2.7.1 Meshing.....	32
2.7.2 Pre-Processor	33
2.7.3 Solver	33
2.7.4 Post-Processor	34
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1 Metode Penelitian	35
3.1.1 Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian.....	35
3.1.2 Alur Kerangka Penelitian	36
3.1.3 Deskripsi Alat dan Bahan Uji	36
3.2 Perancangan dan Perhitung <i>Orifice</i>	42
3.2.1 Perancangan <i>Orifice</i>	42
3.2.2 Perhitungan Laju Aliran Masuk	44
3.3 Eksperimen Pengereng Semprot	45
3.3.1 <i>Set Up</i> Alat Pengereng Semprot.....	45
3.3.2 Prosedur Eksperimen Pengereng Semprot	45
3.4 Langkah Perhitungan Pengereng Semprot	46
3.4.1 Kecepatan Udara di Dalam pengereng Utama.....	46
3.4.2 Langkah Perhitungan Daya	47
3.5 Langkah Simulasi CFD Eksperimen Pengereng Semprot	48
3.6 Hasil Perhitungan	49
3.6.1 Bahan Uji Air	49
3.6.2 Bahan Uji larutan Air Gula 2 %	50
3.6.2 Perhitungan Daya Heater	51
3.7 Data Eksperimen Pengereng Semprot	52

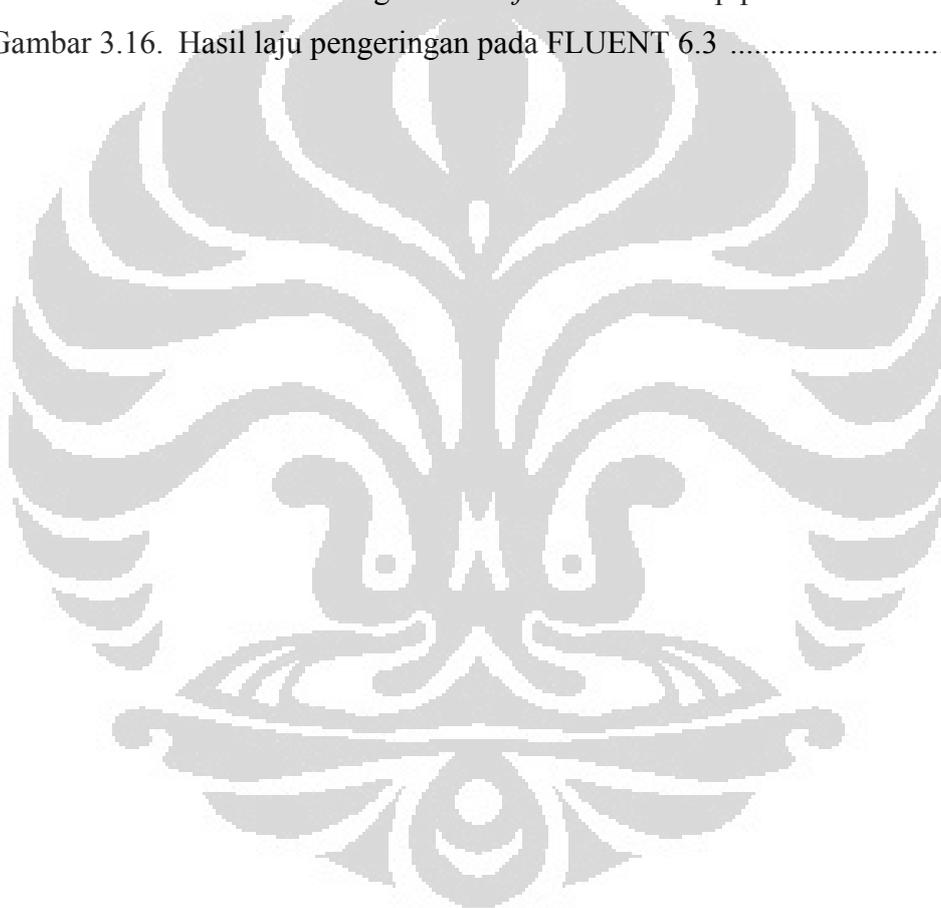
BAB 4 ANALISA HASIL EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD	54
4.1 Analisa Hasil Eksperimen dan Simulasi	54
4.1.1 Bahan Uji Air (H ₂ O)	54
4.1.2 Bahan Uji larutan Air Kandungan Gula 2 %.....	56
4.2 Analisa Perbandingan Hasil Eksperimen Antara Air dan larutan Air dengan Kandungan Gula 2%	57
BAB 5 PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	59
DAFTAR ACUAN	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	63



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Air bergerak melalui celah kapiler bahan	7
Gambar 2.2. Bahan menyerap suhu di sekitarnya	7
Gambar 2.3. Arah kecepatan udara saat pengeringan	8
Gambar 2.4. Aktifitas air vs <i>moisture content</i> berbagai macam jenis makanan	11
Gambar 2.5. Diagram Psikrometrik	12
Gambar 2.6. Garis Jenuh	13
Gambar 2.7. <i>Aspirating Psychrometer</i>	14
Gambar 2.8. Sling Psikrometer	15
Gambar 2.9. Kurva isotermik	16
Gambar 2.10. Aktifitas air vs Kelembaban relatif	16
Gambar 2.11. Grafik Periode dari Pengeringan	18
Gambar 2.12. Skema Pengering Semprot	20
Gambar 2.13. Bentuk <i>Atomizer</i>	24
Gambar 2.14. Skema <i>Atomizer</i>	24
Gambar 2.15. Skema <i>Drying Chamber</i>	25
Gambar 2.16. Bentuk <i>Drying Chamber</i>	25
Gambar 2.17. Bentuk <i>Cyclone Separator</i>	26
Gambar 2.18. Skema Proses <i>Cyclone Separator</i>	27
Gambar 2.19. Masukan <i>Inlet</i> Siklon	28
Gambar 2.20. Bentuk <i>Downcomer</i>	31
Gambar 2.21. Penggambaran sederhana bagaimana mesh bekerja berdasarkan bentuk domain	33
Gambar 3.1. Diagram Alir	36
Gambar 3.2. Rangkaian Pengering Semprot	37
Gambar 3.3 <i>Pressure regulator</i>	37
Gambar 3.4. Pompa Fluida dan Adaptor DC	38
Gambar 3.5. <i>Nozzle</i>	38
Gambar 3.6. Bejana Pengukur Fluida	39
Gambar 3.7. Blower	39
Gambar 3.8. <i>Orifice</i>	40

Gambar 3.9. Kotak Panel	40
Gambar 3.10. Manometer	41
Gambar 3.11. Termometer Alkohol	41
Gambar 3.12. Air Kandungan Gula 2%	42
Gambar 3.13. Lokasi Pengambilan Tekanan untuk <i>orifice</i> dengan titik pengambilan tekanan pada vena kontrakta	43
Gambar 3.14. Lokasi yang disarankan untuk pengambilan tekanan pada <i>orifice</i> konsentrik, plat tipis, pinggir siku	43
Gambar 3.15. Koefisien buang untuk <i>orifice</i> konsentrik pipa	44
Gambar 3.16. Hasil laju pengeringan pada FLUENT 6.3	47

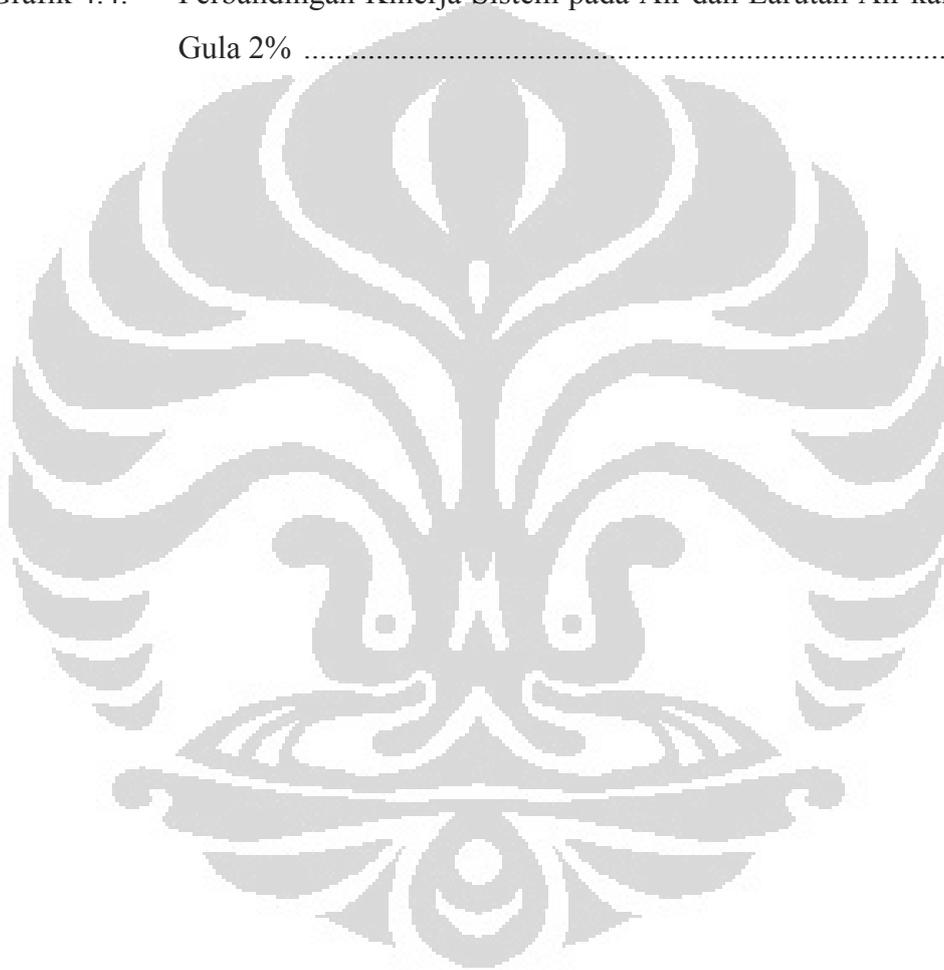


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Variasi Parameter dan Efeknya Pada <i>Cyclone Separator</i> v	30
Tabel 3.1.	Data Air dengan tekanan Kompresor 1 Bar	52
Tabel 3.2.	Data Air dengan tekanan Kompresor 1,5 Bar	52
Tabel 3.3.	Data Air dengan tekanan Kompresor 2 Bar	52
Tabel 3.4.	Data Larutan Air dengan kandungan ula 2 % dengan tekanan Kompresor 1 Bar	53
Tabel 3.5.	Data Larutan Air dengan kandungan gula 2 % dengan tekanan Kompresor 1,5 Bar	53
Tabel 3.6.	Data Larutan Air dengan kandungan gula 2 % dengan tekanan Kompresor 2 Bar	53
Tabel 4.1.	Nilai Parameter Awal dan Kondisi Eksperimen	54
Tabel 4.2.	Kinerja dan Flow Udara pada Temperatur 60 ⁰ C	54
Tabel 4.3.	Perbandingan Kinerja Sistem	58

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1.	Laju Pengeringan vs Flow Udara pada Bahan Air Temperatur Heater 60 ⁰ C	55
Grafik 4.2.	Laju Pengeringan vs Flow Udara pada Bahan Larutan Air dengan kandungan Gula 2%	56
Grafik 4.3.	Kinerja Sistem	57
Grafik 4.4.	Perbandingan Kinerja Sistem pada Air dan Larutan Air kandungan Gula 2%	57



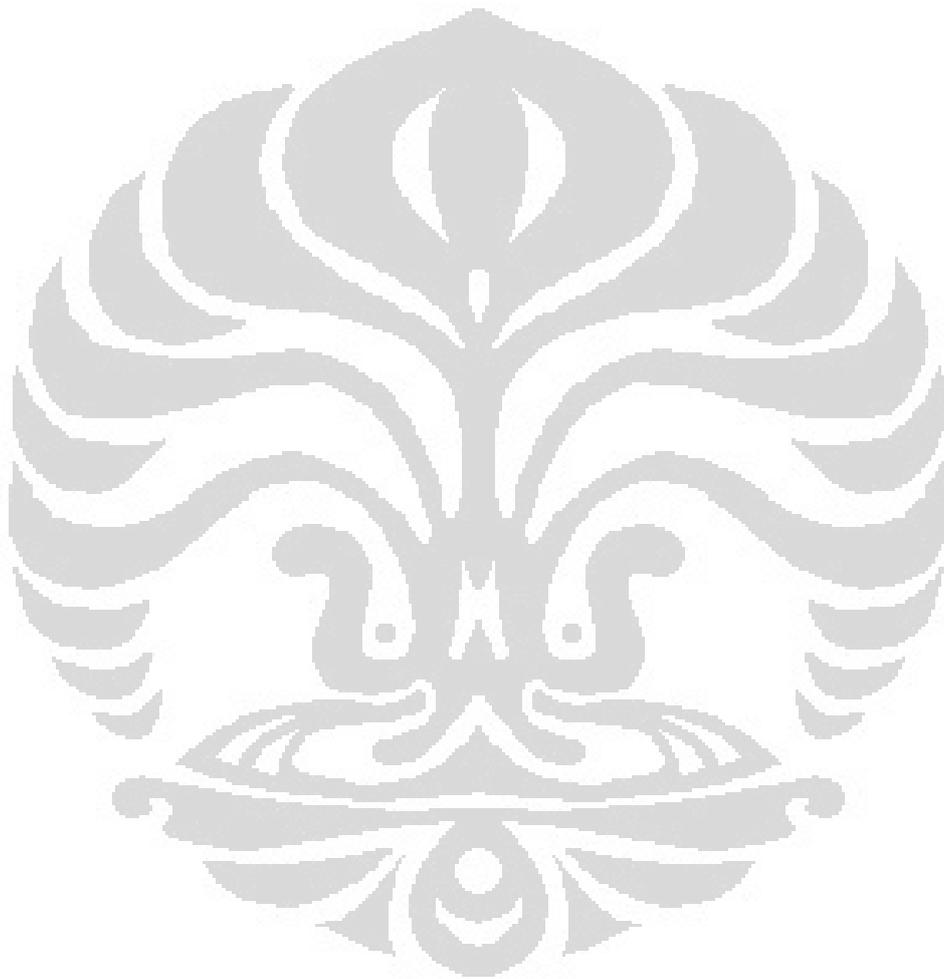
DAFTAR NOTASI

Kadar solid bahan	= TS_1	%
Massa jenis bahan	= ρ_b	(kg m^{-3})
Suhu masukan bahan	= T_b	($^{\circ}\text{C}$)
Kadar air produk kering	= TW_2	% w.w.b.
Massa jenis produk	= ρ_p	(kg m^{-3})
Suhu produk	= T_p	($^{\circ}\text{C}$)
Critical Moisture Content	= CMC	% w.w.b.
Diameter nozzle	= D_{nozzle}	(mm)
Laju aliran bahan	= m_b	($l \text{ jam}^{-1}$)
Diameter droplet	= D_{droplet}	(mikron)
Suhu udara masuk heater	= T_{ud1}	($^{\circ}\text{C}$)
Relative Humidity	= RH	%
Suhu udara keluar heater	= T_{ud2}	($^{\circ}\text{C}$)
Kalor laten penguapan	= λ	(kJ kg^{-1})
Kalor jenis produk	= C_{p_p}	($\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Kalor jenis bahan	= C_{p_b}	($\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Kalor jenis uap air	= $C_{p_{\text{uap}}}$	($\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Kalor jenis udara kering	= $C_{p_{\text{udara}}}$	($\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Konduktivitas termal udara	= k	($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Viskositas udara	= μ	($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Diagram Psikrometrik udara untuk Eksperimen Bahan Air	63
Lampiran 2.	Diagram Psikrometrik udara untuk Eksperimen Bahan Air dengan kandungan Larutan Gula (2%)	64
Lampiran 3.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 77.7 %	65
Lampiran 4.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 193,25 m ³ /jam, Temperatur 60 ⁰ C	66
Lampiran 5.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 193,25 m ³ /jam, Temperatur 70 ⁰ C	67
Lampiran 6.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 193,25 m ³ /jam, Temperatur 80 ⁰ C	68
Lampiran 7.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 283,876 m ³ /jam, Temperatur 60 ⁰ C	69
Lampiran 8.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 283,876 m ³ /jam, Temperatur 70 ⁰ C	70
Lampiran 9.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 283,876 m ³ /jam, Temperatur 80 ⁰ C	71
Lampiran 10.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 396,535 m ³ /jam, Temperatur 50 ⁰ C	72
Lampiran 11.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 396,535 m ³ /jam, Temperatur 60 ⁰ C	73
Lampiran 12.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 396,535 m ³ /jam, Temperatur 70 ⁰ C	74
Lampiran 13.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 495,67 m ³ /jam, Temperatur 50 ⁰ C	75
Lampiran 14.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 495,67 m ³ /jam, Temperatur 60 ⁰ C	76
Lampiran 15.	Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 495,67 m ³ /jam, Temperatur 70 ⁰ C C	77

Lampiran 16. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada
Flow Udara 598,1 m³/jam, Temperatur 40⁰C78



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Alam Indonesia sangat kaya dengan mineral dan hasil perut bumi lainnya seperti hasil pertanian, hasil perikanan dan hasil peternakan. Produk alam tersebut banyak yang membutuhkan proses pengeringan, diantaranya pengering semprot (*spray dryer*). Pada umumnya bahan-bahan yang berupa sistem dispersi (larutan, suspensi, slurry, dan pasta) harus melalui proses pengering semprot, terutama untuk bahan-bahan yang sensitif terhadap suhu tinggi. Jenis pengering ini merupakan salah satu pengering yang banyak digunakan baik untuk memproduksi makanan (pengawetan), obat-obatan, kosmetik, maupun untuk memproduksi bahan-bahan yang digunakan dalam industri.

Banyak sekali kekayaan alam Indonesia yang membutuhkan pengeringan semprot. Pengering semprot (*Spray dryer*) dapat meningkatkan nilai ekonomis suatu bahan yang dapat membantu para produsen untuk meningkatkan mutu dari bahan tersebut. Sebagai contoh, kota Depok terkenal dengan Belimbing Dewi-nya, pengering semprot (*spray dryer*) ini dapat digunakan untuk membuat serbuk sari buah belimbing yang harga ekonomisnya lebih tinggi dibandingkan buahnya. Ini dapat meningkatkan kesejahteraan para petani belimbing karena nilai ekonomis produk mereka meningkat. Tidak menampik kemungkinan dapat dibuat *spray dryer* untuk produk lain dengan memanfaatkan data dari alat uji yang akan dibuat.

Dalam upaya peningkatan nilai tambah komoditi pertanian dan kemampuan daya simpan produk-produk terhadap kerusakan, diperlukan inovasi teknologi pengolahan yang efektif, efisien, dan memiliki nilai ekonomis yang tinggi. Pengeringan menjadi salah satu jawaban dalam memecahkan masalah ini, karena proses pengeringan menjadi suatu faktor yang menentukan baik tidaknya proses dan produk yang dihasilkannya. Dalam proses pengeringan, laju aliran udara panas dan kapasitas bahan yang dikeringkan merupakan faktor penting untuk menentukan kinerja dari sistem pengering semprot.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dari penelitian ini, maka penelitian dirumuskan dengan melakukan eksperimen dan simulasi CFD terhadap pengering semprot. Penelitian dilakukan dengan melakukan perancangan alat ukur kecepatan aliran (*orifice*), melakukan eksperimen dengan berbagai variasi laju aliran udara masuk dan suhu udara panas, melakukan simulasi CFD dari data eksperimen untuk mendapatkan perbandingan kinerja sistem.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kondisi optimal kinerja sistem pengering semprot pada Laboratorium Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
2. Mengetahui kinerja eksperimen dan kinerja simulasi pengering semprot.
3. Mengetahui perbandingan laju pengeringan hasil eksperimen dan simulasi CFD.
4. Mengetahui karakteristik pengering semprot dari beberapa variasi flow udara masuk dan suhu udara panas.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, dibatasi pada:

1. Laju bahan Air masuk pada $1,67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, dan Larutan Air kandungan gula 2% pada $2,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan tekanan udara dari kompresor 2 Bar.
2. Suhu udara panas pada pengering semprot dari $40^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$ dengan kenaikan setiap 10°C .
3. Melakukan Variasi Laju udara masuk dari $0,05 \text{ m}^3/\text{s} - 0,17 \text{ m}^3/\text{s}$
4. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan air dan larutan air dengan kandungan gula 2%.
6. Eksperimen menggunakan pemanas listrik *air heater*.
7. Simulasi CFD dilakukan hanya pada bahan uji air.

1.5 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur.

Metode yang digunakan dalam pencarian studi literatur ini dengan tinjauan kepustakaan berupa buku-buku yang ada di perpustakaan, jurnal-jurnal tertulis maupun *online*, serta referensi artikel yang terdapat di internet.

2. Pengamatan masalah

Merumuskan masalah yang ada dengan cara pengamatan langsung di laboratorium.

3. Perancangan dan pembuatan alat ukur.

Melakukan perhitungan untuk mendapatkan dimensi alat ukur kecepatan aliran (Orifis) yang akan digunakan pada pengering.

4. Pengambilan data eksperimen.

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah data suhu udara kering dan basah keluar dari ruang pengering utama, laju aliran bahan masuk, dan kecepatan aliran udara masuk ke ruang pengering.

5. Simulasi CFD.

Data kecepatan dan suhu udara panas dari perhitungan tersebut diambil kemudian menjadi masukan pada simulasi Fluent 6.3.26, kemudian diperoleh data berupa kadar uap air keluar dari ruang pengering utama.

1.6 Sistematika Penulisan

Agar laporan tugas akhir ini memiliki struktur dan tujuan penulisan yang baik, maka penulisan tugas akhir ini akan mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut:

Bab 1: Pendahuluan

Bagian ini berisi tentang latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2: Dasar Teori

Bab ini menjelaskan tentang konsep pengeringan, pengering semprot (*spray dryer*), karakteristik pengering semprot, prinsip dan komponen-komponen pengering somprot, simulasi CFD.

Bab 3: Metodologi Penelitian

Bab ini membahas tentang tahapan-tahapan yang harus dilakukan selama kegiatan penelitian, peralatan dan alat ukur yang diperlukan selama penelitian, bahan uji yang digunakan, proses pengambilan data, proses pembuatan model dan simulasi CFD yang dilakukan.

Bab 4: Analisa Simulasi dan Eksperimen

Bab ini menjelaskan tentang hasil eksperimen dan simulasi CFD, dan hasil perhitungan matematis nilai laju pengeringan dari eksperimen dan simulasi. Didalamnya terdapat hasil-hasil dari simulasi CFD, dan membahas analisa hasil dari data simulasi dan eksperimen dibandingkan dengan perhitungan menurut teori.

Bab 5: Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil simulasi, pengujian dan beberapa saran yang diberikan untuk perbaikan dan pengembangan penelitian.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Pengertian Pengeringan

Pengeringan adalah proses pengeluaran air atau pemisahan air dalam jumlah yang relatif kecil dari bahan dengan menggunakan energi panas. Hasil dari proses pengeringan adalah bahan kering yang mempunyai kadar air setara dengan kadar air keseimbangan udara (atmosfir) normal atau setara dengan nilai aktivitas air (a_w) yang aman dari kerusakan mikrobiologis, enzimatik dan kimiawi.

Pengeringan adalah suatu peristiwa perpindahan massa dan energi yang terjadi dalam pemisahan cairan atau kelembaban dari suatu bahan sampai batas kandungan air yang ditentukan dengan menggunakan gas sebagai fluida sumber panas dan penerima uap cairan (*Sumber: Treybal, 1980*).

Pengeringan merupakan proses penghilangan sejumlah air dari material. Dalam pengeringan, air dihilangkan dengan prinsip perbedaan kelembaban antara udara pengering dengan bahan makanan yang dikeringkan. Material biasanya dikontakkan dengan udara kering yang kemudian terjadi perpindahan massa air dari material ke udara pengering.

Menurut Brennan (1978), pengeringan atau dehidrasi didefinisikan sebagai pengurangan kandungan air oleh panas buatan dengan kondisi suhu, RH, dan aliran udara terkontrol. Tujuan utama dari pengeringan atau dehidrasi adalah untuk mengurangi kandungan air tanpa merusak struktur produk.

Pengeringan merupakan salah satu proses pengolahan pangan yang sudah lama dikenal. Banyak bahan hasil pertanian yang hanya digunakan setelah dikeringkan terlebih dahulu seperti tembakau, kopi, dan biji-bijian. Meskipun demikian ada kerugian yang ditimbulkan selama pengeringan yaitu terjadinya perubahan sifat fisik dan kimiawi bahan serta terjadinya penurunan mutu bahan.

2.2 Prinsip Dasar Pengeringan

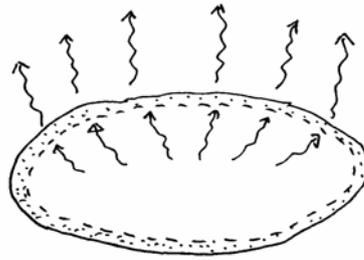
Proses pengeringan pada prinsipnya menyangkut proses perpindahan panas dan massa yang terjadi secara bersamaan (simultan). Pertama-tama panas harus ditransfer dari medium pemanas ke bahan. Selanjutnya setelah terjadi

penguapan air, uap air yang terbentuk harus dipindahkan melalui struktur bahan ke medium sekitarnya. Proses ini akan menyangkut aliran fluida di mana cairan harus ditransfer melalui struktur bahan selama proses pengeringan berlangsung. Jadi panas harus disediakan untuk menguapkan air dan air harus mendifusi melalui berbagai macam tahanan agar supaya dapat lepas dari bahan dan berbentuk uap air yang bebas.

Dalam beberapa kasus, air dihilangkan secara mekanik dari material padat dengan cara di-*press*, sentrifugasi dan lain sebagainya. Cara ini lebih murah dibandingkan pengeringan dengan menggunakan panas. Kandungan air dari bahan yang sudah dikeringkan bervariasi bergantung dari produk yang ingin dihasilkan. Garam kering mengandung 0.5% air, batu bara mengandung 4% air dan produk makanan mengandung sekitar 5% air. Biasanya pengeringan merupakan proses akhir sebelum pengemasan dan membuat beberapa benda lebih mudah untuk ditangani. Pengeringan merupakan metode tertua yang dilakukan manusia dalam usahanya untuk mengawetkan makanan, yang hingga kini metode tersebut masih digunakan (Brennan, 1978). Brooker dkk (1992) menyatakan bahwa pengeringan merupakan proses perpindahan panas dari media pengering ke dalam bahan yang akan dikeringkan dan proses penguapan kandungan air dari bahan yang dikeringkan ke media pengering (udara) yang terjadi secara simultan.

Mekanisme keluarnya air dari dalam bahan selama pengeringan adalah sebagai berikut:

1. Air bergerak melalui tekanan kapiler.
2. Penarikan air disebabkan oleh perbedaan konsentrasi larutan disetiap bagian bahan.
3. Penarikan air ke permukaan bahan disebabkan oleh absorpsi dari lapisan-lapisan permukaan komponen padatan dari bahan.
4. Perpindahan air dari bahan ke udara disebabkan oleh perbedaan tekanan uap.



Gambar 2.1. Air bergerak melalui celah kapiler bahan [1].

2.3 Laju Pengeringan

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam kecepatan pengeringan ialah;

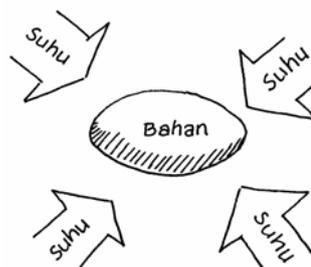
a) Luas Permukaan

Air menguap melalui permukaan bahan, sedangkan air yang ada di bagian tengah akan merembes ke bagian permukaan dan kemudian menguap. Untuk mempercepat pengeringan umumnya bahan pangan yang akan dikeringkan dipotong-potong atau diiris-iris terlebih dulu. Hal ini terjadi karena:

- Pemotongan atau pengirisan tersebut akan memperluas permukaan bahan dan permukaan yang luas dapat berhubungan dengan medium pemanasan sehingga air mudah keluar,
- Potongan-potongan kecil atau lapisan yang tipis mengurangi jarak dimana panas harus bergerak sampai ke pusat bahan pangan. Potongan kecil juga akan mengurangi jarak melalui massa air dari pusat bahan yang harus keluar ke permukaan bahan dan kemudian keluar dari bahan tersebut.

b) Perbedaan Suhu dan Udara Sekitarnya

Semakin besar perbedaan suhu antara medium pemanas dengan bahan pangan makin cepat pemindahan panas ke dalam bahan dan makin cepat pula penghilangan air dari bahan. Air yang keluar dari bahan yang dikeringkan akan menjenuhkan udara sehingga kemampuannya untuk menyingkirkan air berkurang.

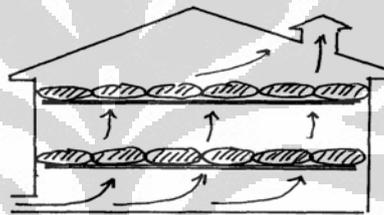


Gambar 2.2. Bahan menyerap suhu di sekitarnya [1].

Jadi dengan semakin tinggi suhu pengeringan maka proses pengeringan akan semakin cepat. Akan tetapi bila tidak sesuai dengan bahan yang dikeringkan, akibatnya akan terjadi suatu peristiwa yang disebut "*Case Hardening*", yaitu suatu keadaan dimana bagian luar bahan sudah kering sedangkan bagian dalamnya masih basah.

c) Kecepatan Aliran Udara

Udara yang bergerak dan mempunyai gerakan yang tinggi selain dapat mengambil uap air juga akan menghilangkan uap air tersebut dari permukaan bahan pangan. Apabila aliran udara disekitar tempat pengeringan berjalan dengan baik, proses pengeringan akan semakin cepat, yaitu semakin mudah dan semakin cepat uap air terbawa dan teruapkan.



Gambar 2.3. Arah kecepatan udara saat pengeringan [1]

d) Tekanan Udara

Semakin kecil tekanan udara akan semakin besar kemampuan udara untuk mengangkut air selama pengeringan, karena dengan semakin kecilnya tekanan berarti kerapatan udara makin berkurang sehingga uap air dapat lebih banyak tertampung dan disingkirkan dari bahan pangan. Sebaliknya jika tekanan udara semakin besar maka udara disekitar pengeringan akan lembab, sehingga kemampuan menampung uap air terbatas dan menghambat proses atau laju pengeringan.

Menurut Earle (1983), faktor-faktor utama yang mempengaruhi kecepatan pengeringan dari suatu bahan pangan adalah :

- a) Sifat fisik dan kimia dari produk (bentuk, ukuran, komposisi, kadar air).
- b) Pengaturan geometris produk sehubungan dengan permukaan alat atau media perantara pemindah panas (seperti nampan untuk pengeringan).
- c) Sifat-sifat fisik dari lingkungan alat pengering (suhu, kelembaban, dan kecepatan udara).
- d) Karakteristik alat pengering (efisiensi pemindahan panas).

2.4 Karakteristik Hidratasi (Penguapan Air)

Karena proses utama dalam pengeringan adalah proses penguapan air, maka perlu terlebih dahulu diketahui karakteristik hidratasi bahan pangan yaitu sifat-sifat bahan yang meliputi interaksi antara bahan pangan dengan molekul air yang dikandungnya dan molekul air di udara sekitarnya. Peranan air dalam bahan pangan dinyatakan dengan kadar air dan aktivitas air (a_w), sedangkan peranan air di udara dinyatakan dengan kelembaban relatif (RH) dan kelembaban mutlak (H).

2.4.1 Kadar Air

Kadar air suatu bahan menunjukkan banyaknya kandungan air persatuan bobot bahan yang dapat dinyatakan dalam persen berat basah (*wet basis*) atau dalam persen berat kering (*dry basis*). Kadar air berat basah mempunyai batas maksimum teoritis sebesar 100 %, sedangkan kadar air berat kering dapat lebih dari 100 %. Kadar air berat basah (b.b) adalah perbandingan antara berat air yang ada dalam bahan dengan berat total bahan. Kadar air berat basah dapat ditentukan dengan persamaan berikut: [1], [8].

$$m = \frac{W_m}{W_t + W_d} \times 100\% = \frac{W_m}{W_t} \times 100\% \quad (2.1)$$

di mana :

m = kadar air berat basah (% b.b)

W_m = berat air dalam bahan (g)

W_d = berat padatan dalam bahan (g) atau berat bahan kering mutlak

W_t = berat total (g)

Kadar air berat kering (b.k) adalah perbandingan antara berat air yang ada dalam bahan dengan berat padatan yang ada dalam bahan. Kadar air berat kering dapat ditentukan dengan persamaan berikut: [1], [8].

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100\% \quad (2.2)$$

di mana :

M = kadar air berat kering (% b.k)

W_m = berat air dalam bahan (g)

W_d = berat padatan dalam bahan (g) atau berat bahan kering mutlak

Berat bahan kering mutlak adalah berat bahan setelah mengalami pengeringan dalam waktu tertentu sehingga beratnya konstan. Pada proses

pengeringan, air yang terkandung dalam bahan tidak dapat seluruhnya diuapkan, meskipun demikian hasil yang diperoleh disebut juga sebagai berat bahan kering.

Di dalam analisis bahan pangan, biasanya kadar air bahan dinyatakan dalam persen berat kering. Hal ini disebabkan perhitungan berdasarkan berat basah mempunyai kelemahan yaitu berat basah bahan selalu berubah-ubah setiap saat, sedangkan berat bahan kering selalu tetap. Metode pengukuran kadar air yang umum dilakukan di Laboratorium adalah metode oven atau dengan cara destilasi. Pengukuran kadar air secara praktis di lapangan dapat dilakukan dengan menggunakan *moisture* meter yaitu alat pengukur kadar air secara elektronik.

Kandungan air pada suatu bahan hasil pertanian terdiri dari 3 jenis yaitu :

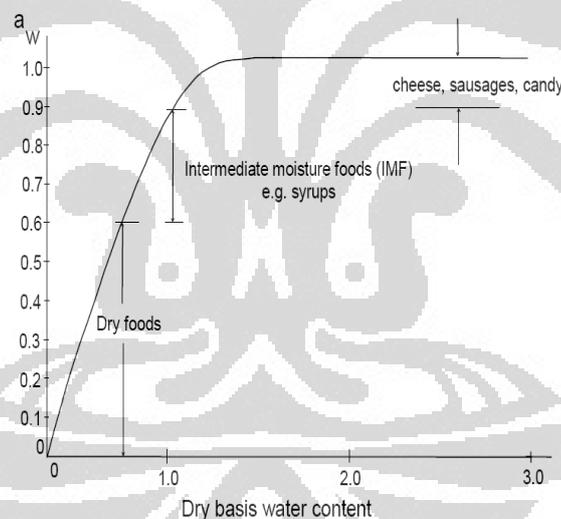
- Air bebas (*free water*). Air ini terdapat pada permukaan bahan, sehingga dapat digunakan oleh mikroorganisme untuk pertumbuhannya serta dapat dijadikan sebagai media reaksi-reaksi kimia. Air bebas dapat dengan mudah diuapkan pada proses pengeringan. Bila air bebas ini diuapkan seluruhnya, maka kadar air bahan akan berkisar antara 12 % sampai 25 %.
- Air terikat secara fisik. Air jenis ini merupakan bagian air yang terdapat dalam jaringan matriks bahan (tenunan bahan) akibat adanya ikatan-ikatan fisik. Air jenis ini terdiri atas :
 - Air terikat menurut sistem kapiler yang ada dalam bahan karena adanya pipa-pipa kapiler pada bahan.
 - Air absorpsi yang terdapat pada tenunan-tenunan bahan karena adanya tenaga penyerapan dari dalam bahan.
 - Air yang terkurung di antara tenunan bahan karena adanya hambatan mekanis dan biasanya terdapat pada bahan yang berserat.
- Air terikat secara kimia. Untuk menguapkan air jenis ini pada proses pengeringan diperlukan energi yang besar. Air yang terikat secara kimia terdiri atas :
 - Air yang terikat sebagai air kristal.
 - Air yang terikat dalam sistem dispersi koloidal yang terdiri dari partikel-partikel yang mempunyai bentuk dan ukuran beragam.

Partikel-partikel ini ada yang bermuatan listrik positif atau negative sehingga dapat saling tarik menarik. Kekuatan ikatan yang ada dalam ketiga jenis

air tersebut berbeda-beda dan untuk memutuskan ikatannya diperlukan energi penguapan. Besarnya energi penguapan untuk air bebas paling rendah, kemudian diikuti oleh air terikat secara fisik dan air terikat secara kimia yang paling besar.

2.4.2 Aktivitas Air

Dalam bahan hasil pertanian, peranan air yang utama adalah sebagai pelarut yang digunakan selama proses metabolisme. Tingkat mobilitas dan peranan air bagi proses kehidupan biasanya dinyatakan dengan besaran aktivitas air (water activity = a_w) yang ada dalam rentang 0 sampai 1. Menurut Winarno (1984) kandungan air pada bahan hasil pertanian akan berpengaruh terhadap daya tahan bahan tersebut dari serangan mikroorganisme. Aktivitas air merupakan salah satu parameter hidrasi yang sering diartikan sebagai jumlah air bebas dalam bahan yang dapat digunakan untuk pertumbuhan mikroorganisme. Setiap mikroorganisme hanya dapat tumbuh pada kisaran a_w tertentu seperti a_w untuk pertumbuhan bakteri 0,90, khamir 0,80 - 0,90 dan kapang 0,60 - 0,70.



Gambar 2.4. Aktifitas air vs *moisture content* berbagai macam jenis makanan [2].

Oleh karena itu untuk mencegah pertumbuhan mikrobial, aktivitas air pada bahan harus diatur. Istilah aktivitas air digunakan untuk menjabarkan air yang terikat atau air bebas dalam suatu sistem yang dapat menunjang reaksi biologis dan kimiawi. Air yang terkandung dalam bahan pangan apabila terikat kuat dengan komponen bukan air, maka akan lebih sukar untuk digunakan dalam aktivitas biologis maupun aktivitas kimia hidrolitik. Menurut Hukum Raoult,

aktivitas air berbanding lurus dengan jumlah mol pelarut dan berbanding terbalik dengan jumlah mol di dalam larutan. [1], [8].

$$a_w = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (2.3)$$

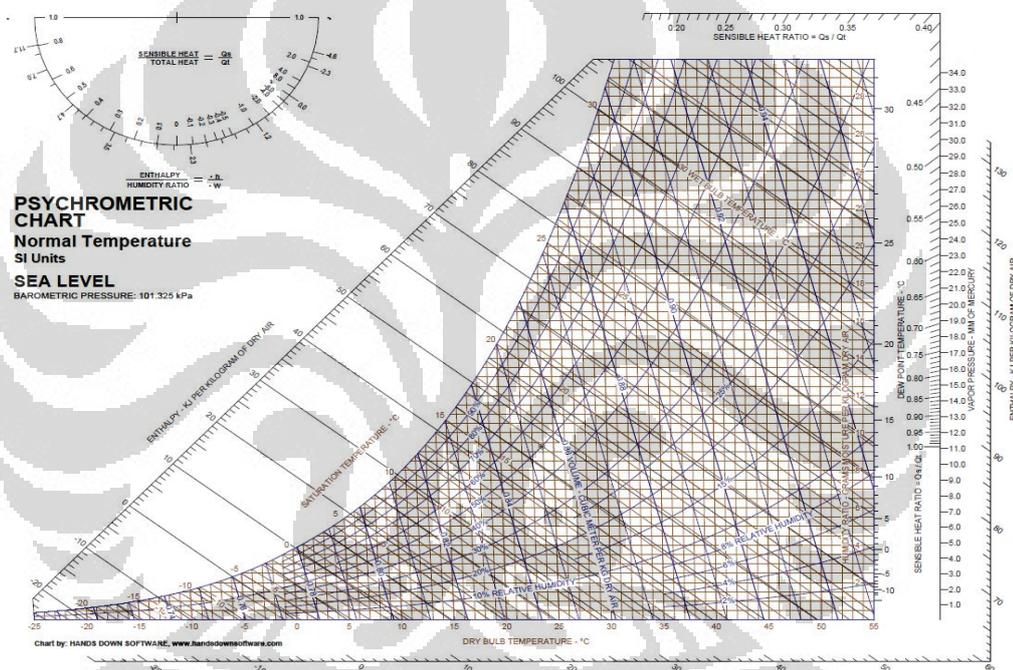
di mana :

n_1 = jumlah mol pelarut

n_2 = jumlah mol zat terlarut

$n_1 + n_2$ = jumlah mol larutan

2.4.3 Diagram Psikrometrik



Gambar 2.5. Diagram Psikrometrik [4].

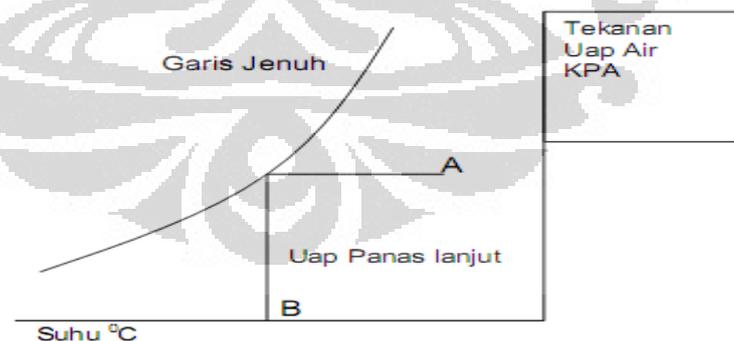
Gambar 2.5 adalah diagram psikometri dimana psikometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air yang mempunyai arti yang sangat penting dalam pengkondisian udara atau penyegaran udara karena atmosfer merupakan campuran antara udara dan uap air. Prinsip-prinsip psikrometrik akan diterapkan pada perhitungan beban, sistem-sistem pengkondisian udara, koil pendingin udara, pengurangan kelembaban, menara pendingin dan kondensor penguapan.

Dalam hal ini ada dua hal yang penting diperhatikan yaitu penguasaan atas dasar-dasar bagan dan kemampuan menentukan sifat-sifat pada kelompok keadaan yang lain misalnya tekanan barometrik yang tidak standar. Diagram yang dikembangkan dari persamaan-persamaan cukup teliti dan dapat digunakan dalam perhitungan-perhitungan keteknikan.

Sifat termal dari udara basah pada umumnya ditunjukkan dengan menggunakan diagram psikrometri seperti terlihat pada diagram dan memakai beberapa istilah dan simbol seperti:

➤ Garis jenuh (*saturation line*)

Garis jenuh ini adalah salah satu istilah pada diagram psikrometri koordinat-koordinat dimana suhu (t) sebagai basis dan tekanan uap air (p_s) sebagai ordinat. Untuk jelasnya dapat dilihat pada diagram psikrometri. Garis jenuh dapat ditarik pada diagram tersebut seperti gambar di bawah. Data untuk garis jenuh dapat dilihat langsung pada tabel tentang air jenuh. Daerah sebelah kanan garis jenuh adalah daerah uap air panas lanjut. Jika uap ini didinginkan dengan tekanan tetap maka akan dicapai garis jenuh yaitu batas uap air mulai mengembun. Gambar di bawah dapat dianggap berlaku untuk campuran udara uap air. Pada gambar menunjukkan apabila titik A merupakan keadaan suatu campuran udara agar terjadi pengembunan, maka suhu campuran tersebut harus diturunkan hingga B udara pada titik A dikatakan mempunyai suhu titik embun B.

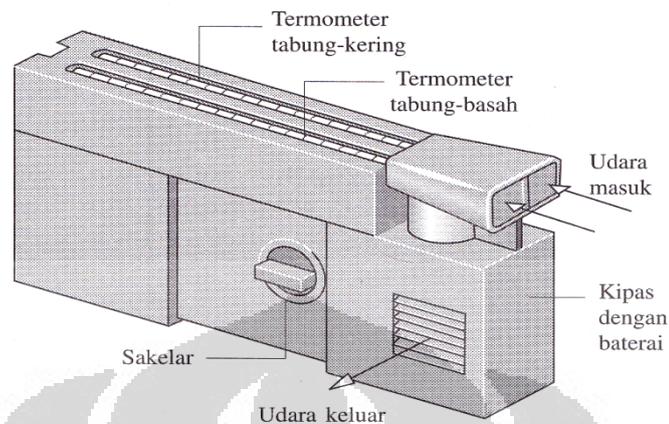


Gambar 2.6. Garis Jenuh [4].

➤ Temperatur Bola Kering (*Dry Bulb*)

Temperatur tersebut dapat dibaca pada termometer dengan sensor kering dan terbuka. Tetapi perlu diperhatikan bahwa penunjukannya tidak selalu tepat

karena ada pengaruh radiasi panas kecuali jika sensornya memperoleh ventilasi yang cukup baik .



Gambar 2.7. *Aspirating Psychrometer* [7].

➤ Temperatur Bola Basah (*Wet Bulb*)

Temperatur ini disebut juga temperatur jenuh adiabatik, diperoleh dengan menggunakan termometer dengan sensor yang dibalut dengan kain basah/kapas basah untuk menghilangkan pengaruh radiasi panas, tetapi perlu diperhatikan bahwa sensor harus dialiri udara sekurang-kurangnya 5 m/s.

➤ Kelembaban Relatif dan Kelembaban Mutlak

Kelembaban relatif atau kelembaban nisbi didefinisikan sebagai perbandingan antara tekanan parsial uap air yang ada di udara dengan tekanan uap jenuh pada suhu yang sama. [4].

$$RH = \left[\frac{P}{P_s} \right] \times 100\% \quad (2.4)$$

di mana :

RH = Kelembaban Relatif (%)

P = Tekanan parsial uap air pada suhu T (atm)

Ps = Tekanan uap air jenuh pada suhu T (atm)

T = Suhu atmosfer ($^{\circ}$ C)

Dalam keadaan setimbang dengan bahan pangan, maka hubungan antara aktivitas air dengan kelembaban relatif dapat ditulis sebagai berikut : [4].

$$a_w = \frac{RH_s}{100} = \frac{P}{P_s} \quad (2.5)$$

di mana :

RH_s = Kelembaban relatif dalam keadaan kesetimbangan (%)

P_s = Tekanan uap jenuh (atm).

Kelembaban mutlak (Y) adalah besaran yang digunakan untuk menentukan jumlah uap air di udara. Untuk menentukan kelembaban nisbi dan kelembaban mutlak dapat digunakan diagram psikrometrik, dengan mengukur suhu udara basah dan suhu udara kering. Pengukuran udara kering dilakukan dengan meletakkan termometer di udara, dan suhu udara basah diukur dengan menggunakan termometer yang ujungnya dibungkus dengan kapas basah.

Alat pengukur kelembaban nisbi secara langsung yang dapat digunakan dengan ketelitian yang cukup tinggi, antara lain adalah Sling Psikrometer dan Higrometer. Sling Psikrometer terdiri dari dua termometer dan satu diantaranya dengan tandon terbungkus kain atau kapas basah. Setelah *wick* dibasahi, maka alat tersebut diputar dan udara sekeliling akan menguapkan air yang ada pada *wick* tersebut.



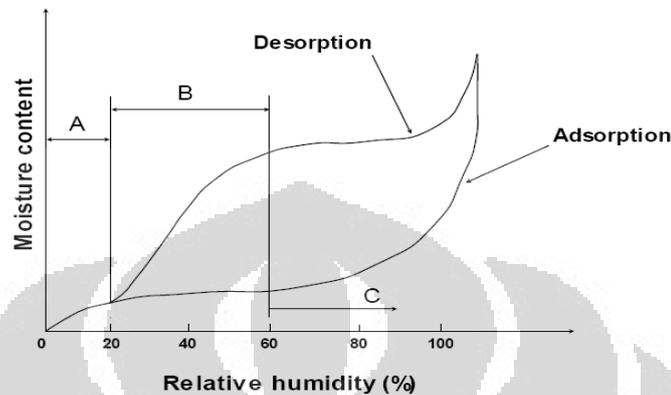
Gambar 2.8. Sling Psikrometer [4]

Suhu bagian yang ada kapasnya akan turun karena untuk penguapan tersebut diperlukan kalor. Suhu bola basah akan terus turun sampai akhirnya tidak dapat turun lagi. Pada keadaan tersebut uap air yang menguap sama dengan uap air yang mengembun di kapas atau dengan kata lain suhu kapas terendah pada keadaan jenuh. Kemudian suhu yang ditunjukkan masing-masing termometer dicatat, dan kelembabannya dapat ditentukan dengan menggunakan diagram psikrometri.

Perbedaan suhu bola kering dan bola basah menunjukkan kelembaban udara itu. Makin besar perbedaan suhu yang ada, maka makin rendah kelembaban nisbi yang ada di udara sekeliling pada saat itu. Suhu bola kering pada diagram psikrometrik ditunjukkan oleh garis tegak lurus, sedangkan suhu bola basah oleh

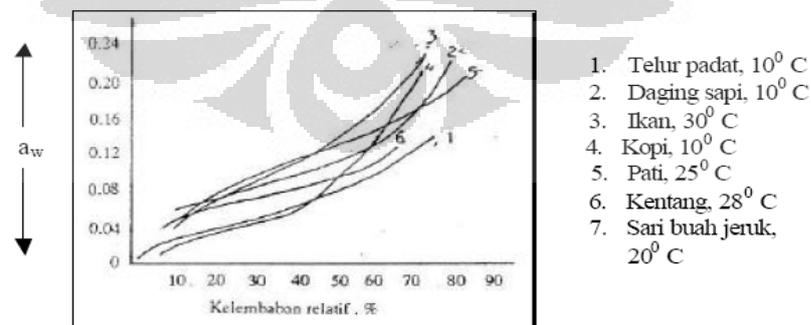
garis-garis miring. Kelembaban nisbi ditunjukkan oleh garis lengkung, sedang garis-garis horizontal menunjukkan kandungan air di udara.

2.4.4 Kurva Sorpsi Isotermik



Gambar 2.9. Kurva isotermik [9].

Bahan pangan hasil pertanian bersifat higroskopis, yaitu dapat menyerap air dari udara sekelilingnya dan juga dapat melepaskan sebagian air yang terkandung ke udara. Secara umum sifat hidratisi ini digambarkan dalam kurva isotermik, yaitu kurva yang menunjukkan hubungan antara kadar air bahan dengan kelembaban relatif kesetimbangan ruangan tempat penyimpanan bahan (RHs) atau aktivitas air (a_w) pada suhu tertentu. Istilah sorpsi air digunakan untuk penggabungan air ke dalam bahan. Apabila proses dimulai dengan bahan kering maka istilah yang digunakan adalah adsorpsi, sedangkan bila proses dimulai dengan bahan basah disebut desorpsi.



Gambar 2.10. Aktifitas air vs Kelembaban relative [9].

Bentuk sorpsi isotermik air untuk setiap bahan adalah spesifik. Pada umumnya kurva sorpsi isotermik bahan hasil pertanian berbentuk sigmoid

(menyerupai huruf S). Pada kenyataannya grafik penyerapan uap air dari udara oleh bahan pangan (kurva adsorpsi) dan grafik pelepasan uap air oleh bahan pangan ke udara (kurva desorpsi) tidak berimpit. Keadaan seperti hal ini disebut fenomena histeresis. Fenomena histeresis diakibatkan oleh adanya perbedaan harga kadar air keseimbangan pada proses adsorpsi dan desorpsi. Umumnya pada kelembaban relatif atau aktivitas air yang sama, kadar air keseimbangan proses desorpsi lebih besar dari proses adsorpsi (Rockland dan Nishi, 1980). Apabila air ditambahkan pada bahan pangan yang sudah dikeringkan, maka molekul-molekul air akan diadsorpsi oleh permukaan bahan. Keadaan ini terdapat pada kisaran a_w antara 0 - 0,20. Air dalam keadaan ini sangat stabil dan tidak dapat dibekukan pada suhu berapapun. Dengan menghilangkan air sampai batas a_w ini maka reaksi kimiawi dan enzimatik dalam bahan pangan dapat dihindari. Air pada kisaran a_w antara 0,20 - 0,70 kurang terikat kuat bila dibandingkan dengan air pada kisaran a_w antara 0 - 0,20.

Di dalam kegiatan sehari-hari kelembaban relatif keseimbangan diungkapkan sebagai kadar air keseimbangan (Equilibrium moisture content atau EMC). Jika suatu bahan hasil pertanian yang mempunyai kadar air tertentu ditempatkan dalam lingkungan dengan suhu dan kelembaban relatif tertentu, maka kadar air bahan akan berubah sampai terjadi keseimbangan antara air dalam bahan dengan air di udara lingkungan tersebut. Kadar air keseimbangan menentukan batas pengeringan yang dilakukan. Di dalam udara yang mempunyai kelembaban relatif dan suhu tertentu, bahan higroskopis hanya dapat dikeringkan sampai kadar air keseimbangan saja.

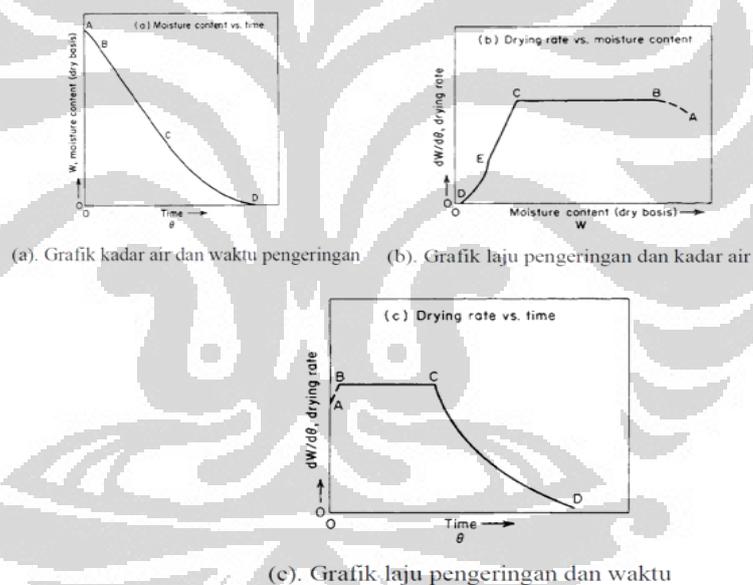
2.5 Proses Pengeringan

Proses pengeringan dapat dibagi menjadi dua periode yaitu periode dengan laju pengeringan konstan dan periode dengan laju pengeringan menurun (Henderson dan Perry, 1976).

Laju pengeringan konstan terjadi sampai air bebas dipermukaan bahan telah hilang dan laju pengeluaran air semakin berkurang. Laju pengeringan konstan tergantung pada luas permukaan bahan, perbedaan kelembaban antara aliran udara dengan permukaan basah, koefisien pindah panas dan kecepatan

udara pengering. Kadar air pada saat laju pengeringan berubah dari konstan ke laju pengeringan menurun dan disebut kadar air kritis. Menurut Henderson dan Perry (1976), laju pengeringan konstan terjadi pada awal proses pengeringan produk biologi dengan kadar air lebih besar dari 70% basis basah dan merupakan fungsi dari suhu, kelembaban dan kecepatan udara pengering dan laju perpindahan dalam bahan ke permukaan sama besar dengan laju penguapannya dari permukaan bahan ke udara sekitar.

Laju pengeringan menurun meliputi dua proses, yaitu perpindahan air dari dalam bahan ke permukaan bahan dan perpindahan uap air dari permukaan bahan ke udara sekitarnya. Semakin besar luas permukaan yang dikeringkan dan semakin besar selisih tekanan uap air permukaan dan udara maka laju pengeringan akan semakin cepat.



Gambar 2.12. Grafik Periode dari Pengeringan [1].

Gambar (a) adalah grafik hubungan kadar air terhadap waktu pengeringan. Gambar (b) adalah grafik hubungan laju pengeringan terhadap kadar air sedangkan gambar (c) adalah grafik hubungan laju pengeringan terhadap waktu. Dari ke-3 gambar, bagian AB menggambarkan periode pemanasan bahan, bagian BC menggambarkan periode laju pengeringan konstan. Titik C merupakan titik kadar air kritis dimana periode laju pengeringan konstan berakhir dan laju pengeringan menurun dimulai. Bagian CD pada gambar (a) menggambarkan periode laju pengeringan menurun. Bagian CE pada gambar (b) dapat

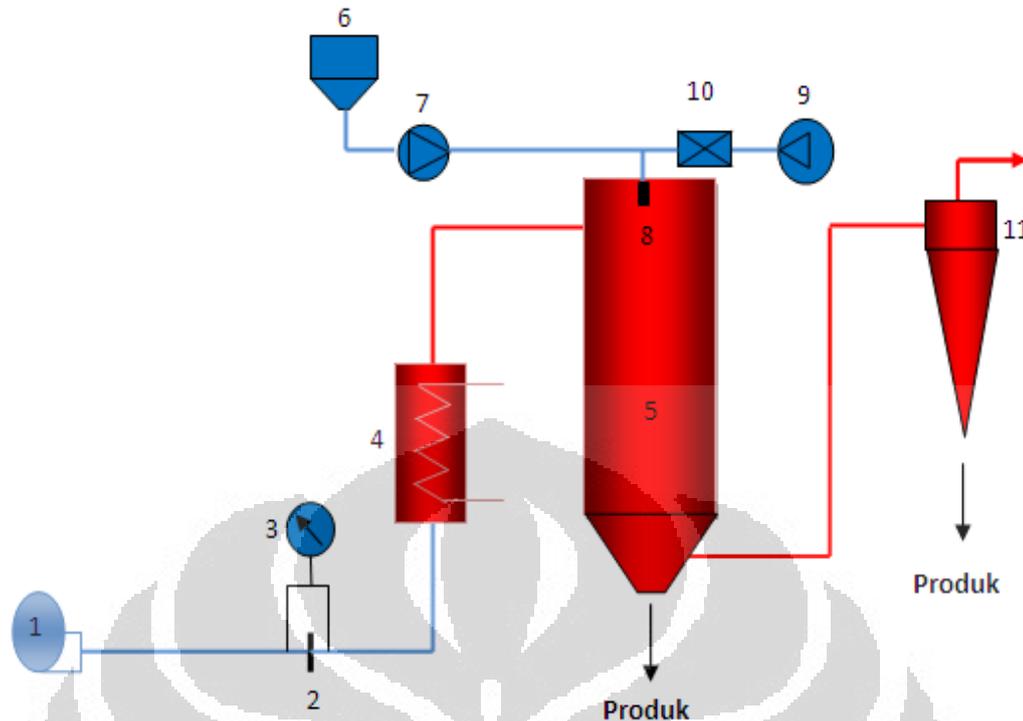
didefinisikan sebagai awal dari periode laju pengeringan menurun dan bagian DE didefinisikan sebagai periode laju pengeringan kedua.

Mekanisme pengeringan dapat diterangkan dengan teori tekanan uap. Air yang diuapkan terdiri dari air bebas dan air terikat. Air bebas berada pada permukaan bahan dan yang pertama mengalami penguapan. Laju penguapan air bebas sebanding dengan perbedaan tekanan uap pada permukaan bahan terhadap tekanan uap udara pengering. Bila konsentrasi air permukaan cukup besar maka akan terjadi laju penguapan yang konstan. Selama proses pengeringan terjadi penurunan suhu bola kering yang disertai dengan kenaikan kelembaban mutlak udara pengering dan entalpi.

2.6 Pengering Semprot

Pengering semprot (*Spray Drying*) adalah proses pemindahan kadar air dari suatu zat dengan proses thermal untuk mencapai keadaan yang sepenuhnya hanya berupa solid.

Pengering semprot (*Spray drying*) adalah cara efektif dalam pengeringan karena kaitannya dengan massa dan perpindahan kalor. Ketika *liquid* disemprotkan melalui *atomizer*, perpindahan kalor terjadi melalui pindahnya kalor dari gas menjadi partikel. Metode perpindahan kalor ini biasanya dikenal sebagai konveksi dan digambarkan persamaan perpindahan kalor konveksi umum $q = hA\Delta T$, di mana q adalah kalor yang dipindahkan, h adalah koefisien perpindahan kalor konveksi, A adalah luas tempat terjadinya perpindahan kalor, dan ΔT adalah perbedaan temperatur antara gas panas dan *liquid*.



Gambar 2.12. Skema Pengering Semprot

Bagian-bagian dari unit *spray dryer* :

1. *Blower*
2. *Orifice*
3. *Manometer*
4. Pemanas udara (*air heater*)
5. *Ruang pengering (drying chamber)*
6. *Feed tank*
7. Pompa umpan
8. *Nozzle atomiser*
9. Kompresor
10. *Filter udara*
11. *Siklon*

Ketika *liquid* melewati *atomizer*, partikel menjadi gas panas sehingga penguapan terjadi. Energi yang dimaksud ini adalah kalor laten. Kalor laten penguapan adalah perubahan entalpi penguapan spesifik dengan perubahan dari *liquid* menjadi gas. Kalor laten penguapan digambarkan oleh persamaan $Q = \Delta H$,

dimana ΔH adalah kalor laten penguapan. Kadar air yang terdapat pada zat yang akan dikeringkan berupa:

- *Water of hydration*
Air yang ada dalam suatu zat terikat secara kimia dengan struktur kimia dari zat yang akan dikeringkan tersebut.
- *Bound water*
Air yang larut dalam zat yang akan dikeringkan sehingga tekanan uapnya lebih kecil dari tekanan uap pada air murni.
- *Free water*
Air yang berada dalam rongga-rongga kapiler dari suatu zat. Tekanan uap yang ada sama dengan tekanan uap yang ada pada air pada umumnya.
- *Absorbed Moisture*
Moisture (uap air) yang melewati dinding sel dan memasuki sitoplasma sel.

Ketika suatu zat akan mengalami proses pengeringan, maka zat yang akan dikeringkan akan mengalami dua proses, yaitu proses terjadinya perpindahan energi (energi panas) dari lingkungan yang digunakan untuk menghilangkan kadar air permukaan dari suatu zat. Sedangkan proses yang lain adalah terjadinya perpindahan kadar air dalam zat karena adanya proses perpindahan energi. Perpindahan energi yang terjadi pada proses pengeringan dapat terjadi secara konduksi, konveksi, atau radiasi dan terkadang adalah kombinasi dari proses-proses tersebut. Pengering yang dipakai dalam dunia industri sangat berbeda dalam bentuk dan desain, tergantung dari proses perpindahan panas yang diinginkan.

Pemindahan kadar air dari permukaan zat tergantung dari suhu ruangan, kelembaban dan aliran udara, bentuk dari zat yang akan dikeringkan, dan tekanan. Pergerakan dari air dalam rongga suatu zat tergantung dari sifat dari zat tersebut, suhu, dan kandungan air itu sendiri. Pada pengeringan salah satu proses yang telah disebutkan di atas adalah faktor yang menentukan laju dari pengeringan, walaupun kedua proses tersebut terjadi secara bersamaan pada saat proses pengeringan terjadi.

2.6.1 Prinsip *Spray Drying*

Kadar air dalam suatu zat dapat terikat ataupun tidak terikat secara kimia dengan zat yang akan dikeringkan. Ada dua cara dalam memindahkan kadar air yang ada dalam suatu zat yang akan dikeringkan, yaitu:

1. Bila tekanan uap dari zat cair pada permukaan zat sama dengan tekanan atmosfer maka pengeringan dilakukan dengan cara menaikkan temperatur dari kadar air sampai titik didihnya. Apabila zat yang akan dikeringkan sensitif terhadap panas maka temperatur titik didihnya dapat diturunkan dengan menurunkan tekanan. Tekanan yang diturunkan tidak boleh dibawah titik *triple point* karena air yang ada pada zat-zat akan membeku.
2. Pengeringan dilakukan dengan cara konveksi. Pengeringan ini dilakukan dengan mengalirkan udara panas ke zat yang akan dikeringkan sehingga kadar air yang ada pada zat yang akan dikeringkan dapat terbawa oleh udara. Pada kondisi ini tekanan uap pada air dalam zat lebih kecil dari tekanan atmosfer.

Pemilihan tipe pengering dan ukuran dari pengering sangat tergantung dari karakteristik dari proses pengeringan yang diinginkan. Selain itu informasi lain yang diperlukan adalah sifat dari zat yang akan dikeringkan, kesetimbangan dari zat antara kadar air, kepekaan zat terhadap temperatur, dan juga keterbatasan temperatur yang dapat dicapai dari sumber pemanas.

Laju pengeringan dapat diketahui dengan mengukur jumlah kadar air yang hilang per satuan waktu. Metode ini menggunakan perbedaan humiditas dan juga pengukuran berat secara terus menerus. Laju pengeringan pada suatu zat dibagi menjadi dua, yaitu : *constant rate*, dan *falling rate*. *Constant rate* adalah pengeringan dimana kadar air yang hilang pada zat yang akan dikeringkan berjalan secara tetap. Hal ini terjadi karena air yang terkandung dalam zat yang dikeringkan termasuk dalam *free water*. *Drying time* untuk *constant rate* dapat dihitung dengan rumus : [1], [8].

$$t_c = \frac{\lambda \cdot \rho_w \cdot (D_0^2 - D_c^2)}{8 \cdot k_a \cdot (T_a - T_c)} \quad (2.6)$$

Pada *Falling rate* laju pengeringan menjadi menurun karena kadar air yang ada pada zat yang akan dikeringkan termasuk kategori *water of hydration* atau *bound water* sehingga air yang akan diuapkan lebih sulit dari pada *free water*. *Drying time* untuk *falling rate* dapat dihitung dengan rumus : [1], [8].

$$t_f = \frac{\lambda \cdot \rho_d \cdot D_c^2}{6 \cdot k_a \cdot (T_a - T_w)} \cdot (m_c - m_f) \quad (2.7)$$

Titik yang menjadi batas antara *constant rate* dengan *falling rate* disebut titik kritis. Pada pengeringan titik kritis ini harus diketahui karena akan menentukan hasil akhir yang diinginkan dan juga waktu yang diperlukan untuk pengeringan.

2.6.2 Komponen-Komponen Spray Dryer

Pengering semprot (*Spray dryer*) memiliki beberapa unit komponen untuk menjalankan fungsinya.

A. Atomizer

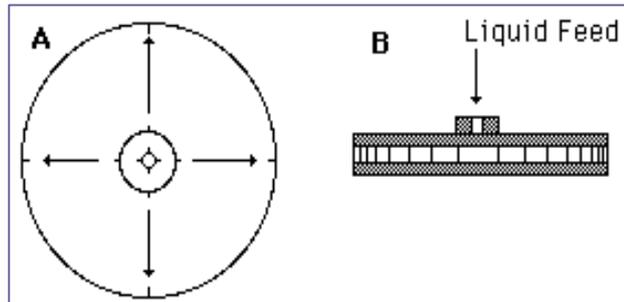
Bagian ini berfungsi untuk melakukan proses atomisasi, yaitu mengubah *feed* menjadi *spray*. Ada tiga jenis tipe *atomizer*, *rotary atomizer*, *pressure nozzles*, dan *pneumatic two-fluid nozzles*, namun umumnya hanya dua yang biasa digunakan :

1. *Rotary atomizer*

Atomizer tipe ini menggunakan gaya sentrifugal. Pertama-tama, *liquid feed* masuk ke dalam sebuah cakram (*disc*) yang berputar dengan kecepatan tinggi, kemudian *feed* mengalir keluar permukaan menuju pori-pori dan hancur dalam bentuk percikan (*spray droplets*). *Rotary atomizer* menggunakan sistem bertekanan rendah. Karakteristik dari *spray* dapat lebih beragam tergantung dari jenis *feed*, *feed rate*, kecepatan putar *atomizer* dan desain (bentuk) *atomizer*. Desain dari *wheel* pada *atomizer* memiliki *vanes*, *spacers* atau *bushing*, sedangkan desain dari *disc* memiliki plat (tanpa baling-baling), *cups*, dan *inverted bowls*. *Rotary atomizer* mudah dioperasikan dan mampu menangani *feed rate* yang berubah-ubah. Keuntungan lainnya adalah mampu menangani *high feed rate* tanpa perlu menduplikasi *atomizer*, dan menangani *abrasive feedstocks*.



Gambar 2.13. Bentuk Atomizer



Gambar 2.14. Skema Atomizer

2. *Pressure Nozzles*

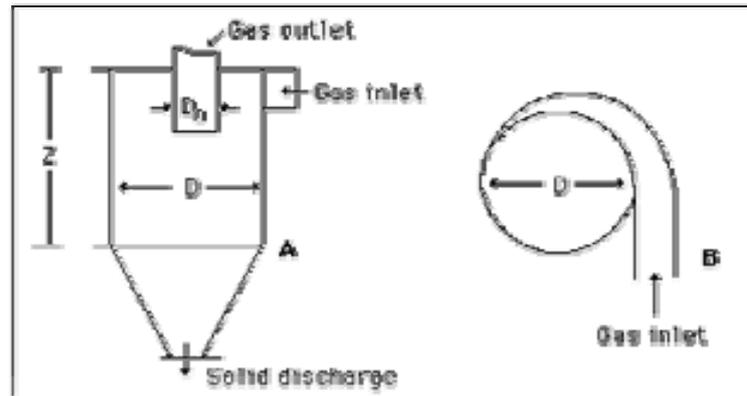
Feed dikonsentrasikan ke *nozzle* di bawah tekanan tinggi. Saat itu, energi tekanan dikonversi menjadi energi kinetik, dan *feed* keluar dari *nozzle* dengan kecepatan tinggi dan hancur menjadi percikan (*spray*). *Feed* dibuat berputar di dalam *nozzle*, menjadikannya *spray* dengan bentuk seperti *cone*. *Spray* dari *nozzle* umumnya lebih kasar dan kurang homogen dibanding menggunakan *wheel*. Pada *low feed rate*, karakteristik *spray* dapat dibandingkan, dan pada *high feed rate*, duplikasi *nozzle* dibutuhkan agar proses atomisasi dapat berjalan dengan baik. *Atomizer* tipe *nozzle* biasanya digunakan untuk membentuk partikel/bubuk kasar berukuran 120-300 mikron .

B. Heater

Heater adalah bagian dari *spray dryer* yang berfungsi untuk memanaskan *feed* yang mengalir masuk ke dalam *drying chamber*, sehingga akan timbul uap-uap gas akibat pemanasan.

C. Drying Chamber

Bagian ini berfungsi sebagai tempat bertemunya material yang akan dikeringkan dengan udara panas. Bentuk *chamber* bergantung dari tipe *atomizer* yang dipakai karena sudut *spray* menentukan arah jatuh *droplet* dan juga diameter dan tinggi dari *chamber* pengeringan. Untuk mendapatkan ukuran partikel yang sama atau homogen, kita dapat menggunakan alat pengering (*dryer*) yang disebut dengan *spray dryer*.



Gambar 2.15. Skema *Drying Chamber*

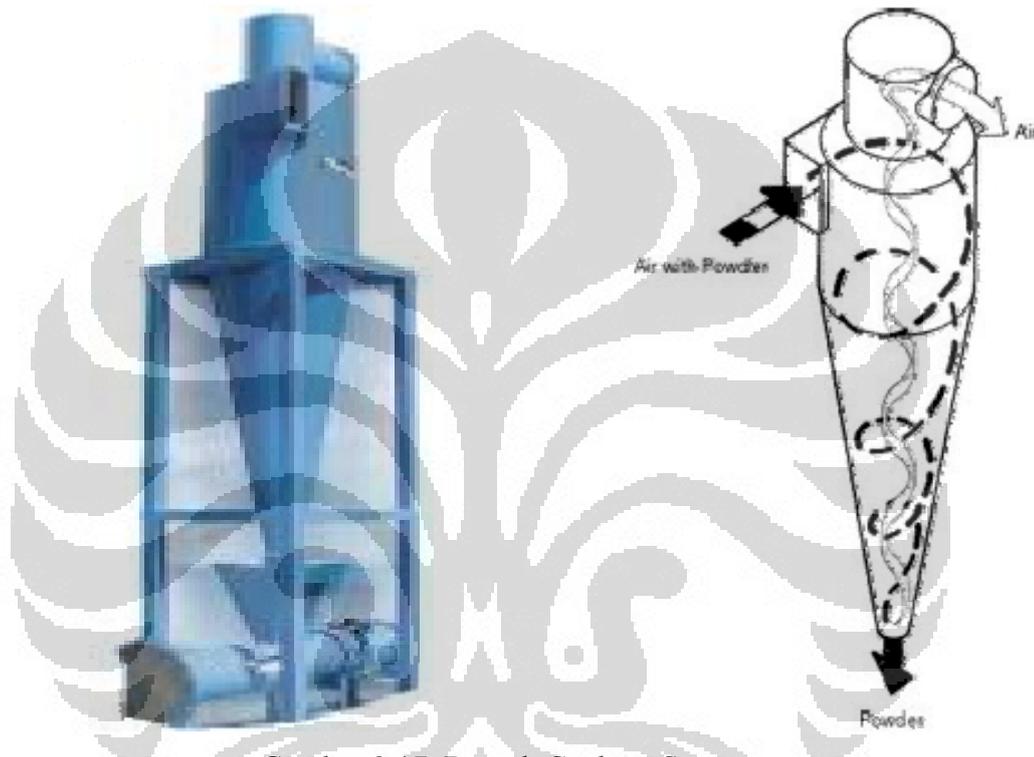
Alat ini dapat menghasilkan ukuran partikel yang sama (homogen). Karena hal ini adalah kelebihan dari *spray dryer* jika dibandingkan dengan alat-alat pengering yang lainnya. Namun, alat ini memiliki efisiensi yang lebih kecil dibandingkan dengan alat-alat pengering yang lainnya, yaitu berkisar antara 25-30%.



Gambar 2.16. Bentuk *Drying Chamber*

D. Cyclone Separator

Alat ini berfungsi untuk memisahkan partikel padat dari gas atau cairan dengan memanfaatkan gaya sentrifugal. Konstruksinya sangat sederhana. Siklon digunakan untuk memisahkan partikel yang memiliki diameter diatas 5 mikron. Desain yang umum digunakan adalah *reverse flow cyclone*. Dalam mendesain siklon, ada dua standar yang dipertimbangkan, yaitu *high efficiency cyclone* dan *high throughput design*.

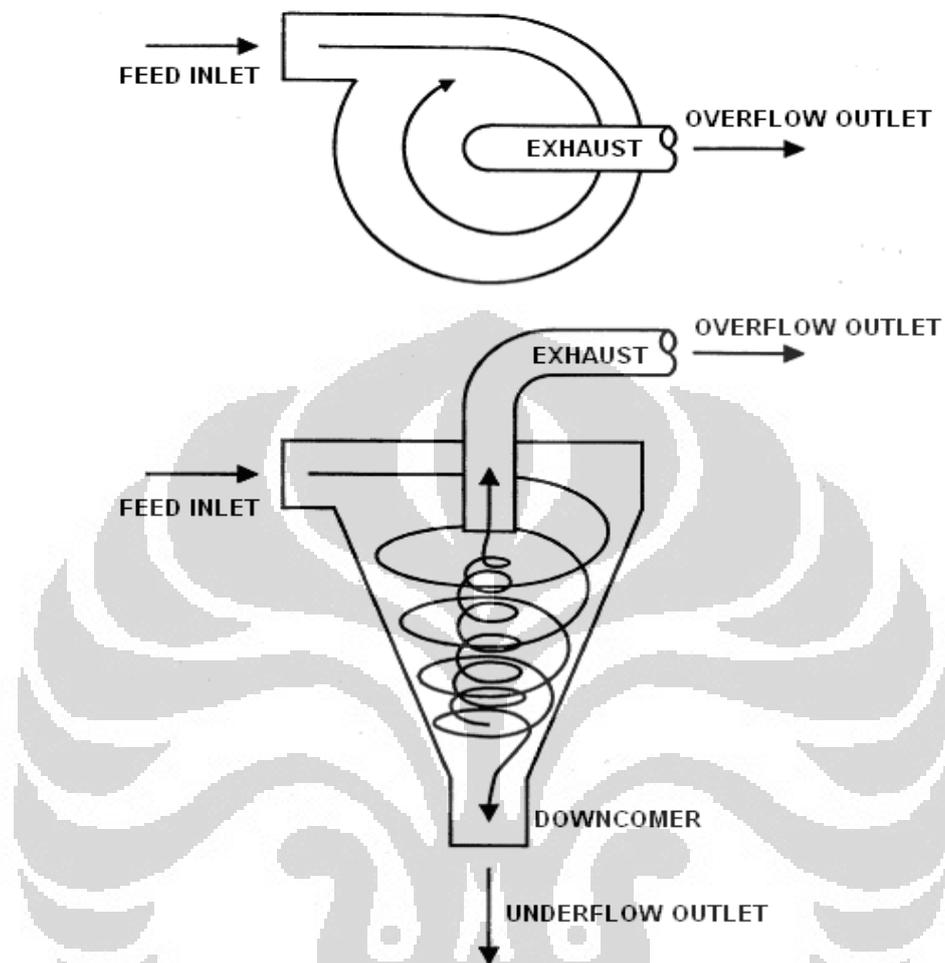


Gambar 2.17. Bentuk Cyclone Separator

Mekanisme Cyclone Separator

Siklon terdiri dari suatu silinder vertikal dengan suatu alas berbentuk kerucut. *Hydrocyclones* tidak mempunyai komponen yang bergerak, dan memompa fluida secara tangensial. Bagian yang silindris ditutup pada bagian puncaknya dengan suatu penutup, ditambah pipa keluaran fluida, yang dikenal sebagai *exhaust pipe*, menempel dengan badan siklon. Pada *exhaust pipe* perlu diperpanjang dengan pipa yang berbelok untuk mengurangi keluarnya fluida *inlet* secara prematur. Pipa yang terletak dekat dengan penutup puncak siklon adalah *feed inlet pipe* untuk masukan fluida menuju siklon yang dapat berbentuk pipa lingkaran maupun kotak. Selanjutnya partikel-partikel inlet yang tidak terangkat

keluar melalui *exhaust pipe* jatuh ke *downcomer*. Berikut ini adalah gambaran umum dari siklon.



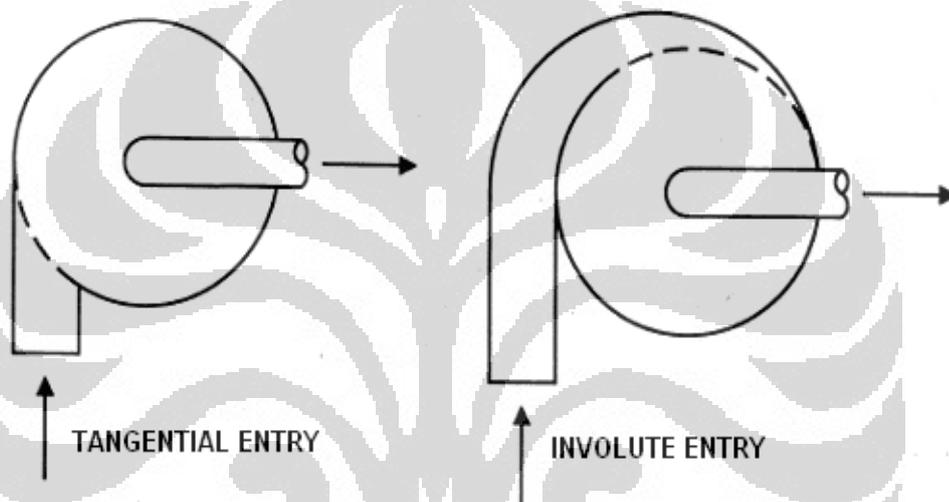
Gambar 2.18. Skema Proses *Cyclone Separator*

Pola Aliran Fluida

Pola aliran fluida dalam siklon adalah suatu gerakan spiral (pilinan) di dalam suatu gerakan spiral. Dengan masukan yang tangensial, fluida mengalir dalam arus yang mengarah ke bawah sepanjang bagian permukaan badan siklon. Gerakan ini ditambah gerakan rotasi menciptakan *outer spiral*. Keberadaan dari *exhaust* dengan bentuk membelok dan tidak semua fluida meninggalkan *downcomer* membantu dalam *inward migration* sebagian fluida dari *external spiral*. Semakin meningkatnya *inward migration*, maka fluida semakin dekat pada bagian kerucut siklon yang menuju *downcomer*. Fluida ini kemudian berbalik arah vertikalnya sehingga mengalir ke atas menuju *exhaust*. Gerakan spiralnya berputar dalam arah putaran yang sama.

Masukan Inlet Siklon

Fungsi utama dari mulut masukan pada siklon adalah untuk menyediakan suatu pola aliran yang lancar ketika fluida masuk ke dalam siklon. Ada dua bentuk masukan inlet siklon yang umum digunakan, yaitu *tangential* dan *involute*. Masukan inlet *involute* digunakan untuk meningkatkan konversi energi kinetik ke gaya sentrifugal yang efisien. Hal ini memperkecil turbulensi yang menghambat proses pemisahan (separasi) dan dapat mengakibatkan pengausan yang berlebihan. Gambar berikut memperlihatkan kedua masukan inlet *tangential* dan *involute*.



Gambar 2.19. Masukan Inlet Siklon

Proses Pemisahan Partikel Padat dari Cairan

Prinsip distribusi ukuran partikel itu relatif sederhana. Partikel yang lebih besar berpindah tempat ke dinding siklon dan kemudian bergerak ke bawah saat partikel yang lebih kecil cenderung untuk keluar terangkat melalui *exhaust*.

Proses pemisahan menurut densitas

Partikel-partikel padat terpisah begitu komponen yang lebih berat "tenggelam" atau jatuh ke *downcomer* saat komponen yang lebih ringan melayang terangkat ke *exhaust pipe* pada siklon. Material dengan densitas yang lebih padat tersaring dan material yang kurang padat keluar tidak tersaring. Proses pemisahan dua partikel padat dapat menjadi paling efektif jika salah satu partikel padat

memiliki densitas yang lebih kecil dibanding fluida dan partikel padat yang lain memiliki densitas lebih besar dibanding fluida.

Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*) dan Laju aliran

Siklon menghasilkan dayanya untuk melakukan proses pemisahan dengan menggunakan energi dari tekanan fluida. Nilai *pressure drop* merupakan perbedaan tekanan antara masukan *inlet* siklon dengan keluaran *exhaust* siklon. Suatu siklon dengan dimensi tertentu, digunakan untuk menyaring suatu fluida, akan memberikan hubungan tertentu antara debit fluida dengan *pressure drop* statis. Oleh karena itu kedua variabel saling memiliki ketergantungan, dengan meningkatnya *pressure drop* yang mendorong meningkatnya laju aliran.

Efisiensi Pemisahan

Efisiensi yang dimaksud disini adalah suatu ukuran kemampuan dari siklon untuk memperoleh partikel padat yang ditampung pada *product vessel*. Penampungan partikel padat pada *product vessel* itu diperlukan karena sebagian besar fluida akan berjalan terus melalui *exhaust* dan proses selanjutnya. Uraian sederhana ini dapat menghasilkan efisiensi yang sempurna dengan menampung 100% padat pada *product vessel* dan memisahkan 100% fluida melalui *exhaust*. Oleh karena itu, jika tujuannya untuk memisahkan partikel padat dari suatu fluida, efisiensinya ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$E = \frac{S_u}{S_i} - \frac{L_u}{L_i} \quad (2.8)$$

di mana E adalah efisiensi pemisahan dari partikel padat yang ditampung ke *product vessel*, S adalah jumlah dari partikel padat yang ada, L adalah jumlah cairan yang ada, dan notasi i dan u mengacu pada *inlet* dan *outlet*.

Flow ratio dapat dinyatakan sebagai *total outlet* dibagi oleh *total inlet*:

$$R_f = \frac{(S_u + L_u)}{(S_i + L_i)} \quad (2.9)$$

Tabel 2.1 Variasi Parameter dan Efeknya Pada *Cyclone Separator*

Parameter	Variasi	Efek	Sebab
Diameter <i>Exhaust</i>	Diperbesar	Efisiensi menurun	Lebih memungkinkan untuk partikel padat tersedot ke atas
Perbedaan Tekanan	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Laju aliran meningkat, naiknya gaya tarik ke bawah
Diameter <i>Downcomer</i>	Diperbesar	Mencegah <i>overload</i> , dan dapat juga menurunkan efisiensi	Menyebabkan jatuhnya partikel padat bersama fluida
Debit fluida	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Gaya tarik ke bawah meningkat
Viskositas cairan	Diperbesar	Efisiensi menurun	Partikel padat lebih sulit menetap
Perbedaan densitas partikel padat dan cairan	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Lebih memungkinkan partikel padat untuk berpindah ke gerakan spiral berlawanan pada Siklon
Ukuran partikel padat	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Lebih memungkinkan partikel padat untuk berpindah ke dinding permukaan siklon
Diameter <i>inlet</i>	Diperbesar	Efisiensi menurun	Jumlah masukan tetap sama tetapi pada tekanan yang lebih rendah

Diameter Siklon	Diperbesar	Efisiensi menurun	Gaya tarik ke bawah menurun
Panjang Siklon	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Lamanya proses meningkat
Panjang <i>Exhaust</i>	Diperbesar	Efisiensi menurun	Lebih memungkinkan untuk partikel padat tersedot ke atas

<http://hypertextbook.com>

E.

Blower

Blower adalah bagian dari *spray dryer* yang berfungsi untuk menghisap partikel-partikel bahan uji dengan daya yang dimilikinya. Partikel-partikel gas yang tidak terpakai akan dibuang melalui *exhaust pipe*, sedangkan partikel-partikel padat akan jatuh ke *downcomer* dan ditampung di *product vessel*.

F. **Downcomer**

Downcomer merupakan perpanjangan dari bagian bawah siklon. Bagian ini berfungsi untuk memperkecil peluang partikel padat yang sudah bergerak ke bawah untuk bergerak ke atas kembali. Dengan demikian, efisiensi dapat ditingkatkan karena jumlah partikel padat yang terbang akan berkurang.



Gambar 2.20. Bentuk Downcomer

Downcomer menyebabkan konsentrasi partikel pertama-tama menjadi acak dan kemudian naik ke atas serta menumpuk dalam *downcomer*. Kinerja siklon selalu meningkat terhadap kenaikan diameter partikel, dengan kenaikan yang

semakin lama semakin mengecil. Hal ini dapat dimengerti mengingat semakin besar ukuran partikel semakin besar pula rasio berat partikel terhadap gaya-gaya dinamik yang terjadi. Terhadap penambahan panjang *downcomer* kinerja juga meningkat, tapi dengan peningkatan kinerja tiap penambahan panjang *downcomer* yang meningkat pula. Pertambahan panjang *downcomer* ini akan semakin memperkecil peluang partikel yang sudah terjebak untuk bergerak ke atas kembali. Peningkatan kinerja tiap penambahan panjang *downcomer* yang meningkat ini belum tentu berlaku umum, sehingga untuk dapat mengetahuinya dibutuhkan banyak simulasi.

2.7 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah perangkat lunak analisa suatu sistem fisik yang melibatkan aliran fluida, perpindahan kalor dan fenomena lain yang berhubungan dengan cara simulasi dengan bantuan komputer. Dengan kemampuan dan aplikasinya yang luas, sehingga CFD menawarkan kelebihan-kelebihan terhadap metode eksperimental pada desain sistem fluida, seperti:

- Pengurangan waktu dan biaya pada perancangan.
- Kemampuan untuk melakukan pengamatan pada eksperimen terkontrol
- yang sulit atau tidak mungkin untuk dilakukan (pada sistem yang besar).
- Kemampuan untuk melakukan pengamatan sistem dalam kondisi
- berbahaya dan di luar batasan normal kerjanya (pengamatan keselamatan
- dalam kecelakaan).
- Hasil pengamatan yang sangat mendetail.

2.7.1 Meshing

Persamaan diferensial parsial yang menentukan aliran fluida dan perpindahan panas tidak biasa diterima dalam solusi analitis, kecuali untuk kasus yang sangat sederhana. Oleh karena itu, untuk menganalisa aliran fluida, daerah aliran dibagi menjadi subdomain yang lebih kecil (membuat geometri sederhana seperti heksahedral dan tetrahedral dalam 3 dimensi, dan kuadrilateral dan segitiga dalam 2 dimensi) dan persamaan pengatur diskritisasi dapat diselesaikan dengan membagi domain dalam beberapa bagian. Umumnya, satu

dari tiga metode digunakan untuk menyelesaikan persamaan sistem: volume hingga, elemen hingga, atau elemen *differences*. Ketelitian harus diterapkan untuk meyakinkan kekontinuitas persamaan yang melewati dua permukaan di antara dua subdomain, demikian untuk mendapatkan persamaan perkiraan di dalam variasi bagian dapat dimasukkan bersama-sama untuk memberikan gambaran lengkap dari aliran fluida di tiap domain. Setiap bagian dari domain dikenal sebagai elemen atau sel, dan kumpulan dari semua elemen dikenal sebagai *mesh* atau grid.



Gambar 2.21. Penggambaran sederhana bagaimana *mesh* bekerja berdasarkan bentuk domain

2.7.2 Pre-Processor

Pre-processing berisikan masukan mengenai permasalahan fluida yang akan dianalisa dan perubahan masukan tersebut menjadi bentuk yang dapat diselesaikan oleh solver. Pada tahap pre-processing dilakukan:

- Pendefinisian geometri daerah yang akan diamati (*computational domain*).
- Pembuatan grid, pembagian domain menjadi bagian-bagian kecil sub-domain yang tidak bertindihan, yaitu menjadi sel-sel.
- Pemilihan fenomena fisik dan kimia yang akan dimodelkan.
- Penentuan sifat-sifat fluida.
- Spesifikasi kondisi batas dan kondisi awal.

2.7.3 Solver

Persamaan atur adalah berbentuk persamaan diferensial parsial. Untuk dapat diselesaikan dengan komputer, maka persamaan tersebut harus ditransformasikan ke dalam bentuk numerik. Terdapat tiga teknik utama penyelesaian numerik CFD, yaitu dengan *finite difference*, *finite element*, dan

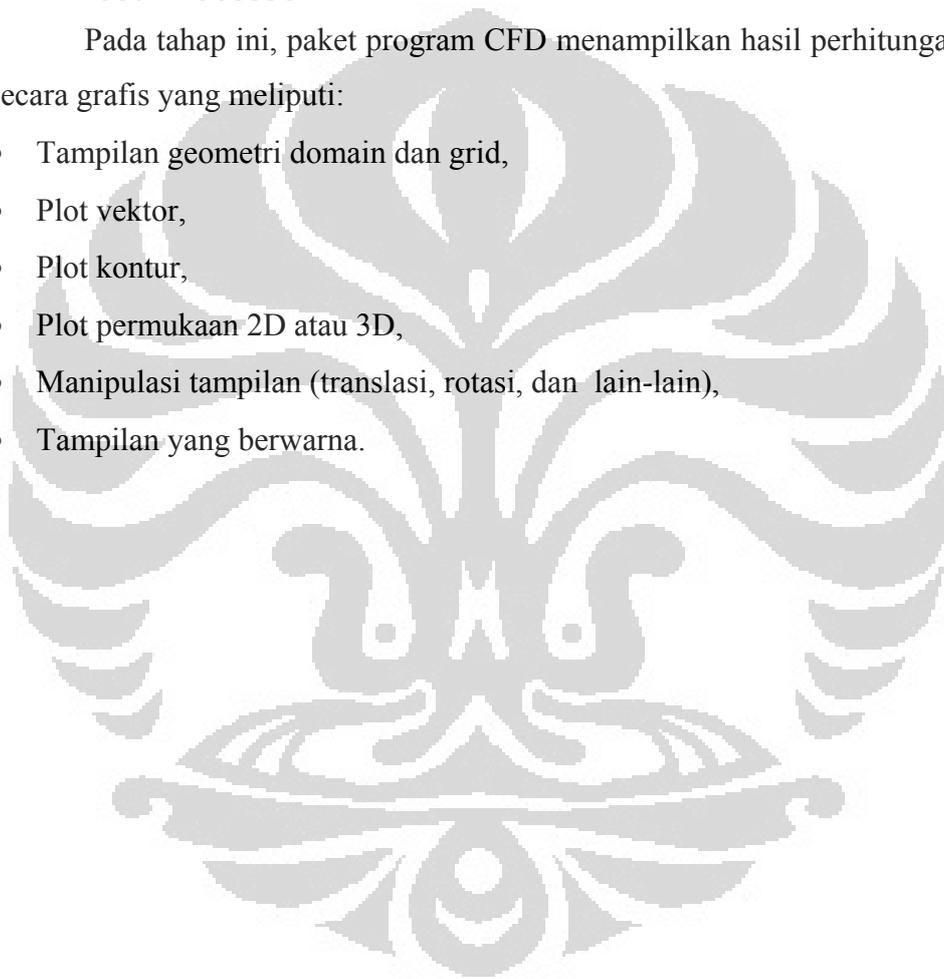
finite volume. Pada garis besarnya, metode numerik yang menjadi basis *solver* melakukan langkah-langkah berikut:

- Perkiraan variabel aliran yang belum diketahui dengan suatu fungsi sederhana.
- Diskritisasi dengan mensubstitusi perkiraan tersebut pada persamaan pengatur dan melakukan perhitungan matematis yang berulang.
- Penyelesaian dari persamaan pengatur.

2.7.4 Post-Processor

Pada tahap ini, paket program CFD menampilkan hasil perhitungan *solver* secara grafis yang meliputi:

- Tampilan geometri domain dan grid,
- Plot vektor,
- Plot kontur,
- Plot permukaan 2D atau 3D,
- Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, dan lain-lain),
- Tampilan yang berwarna.



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

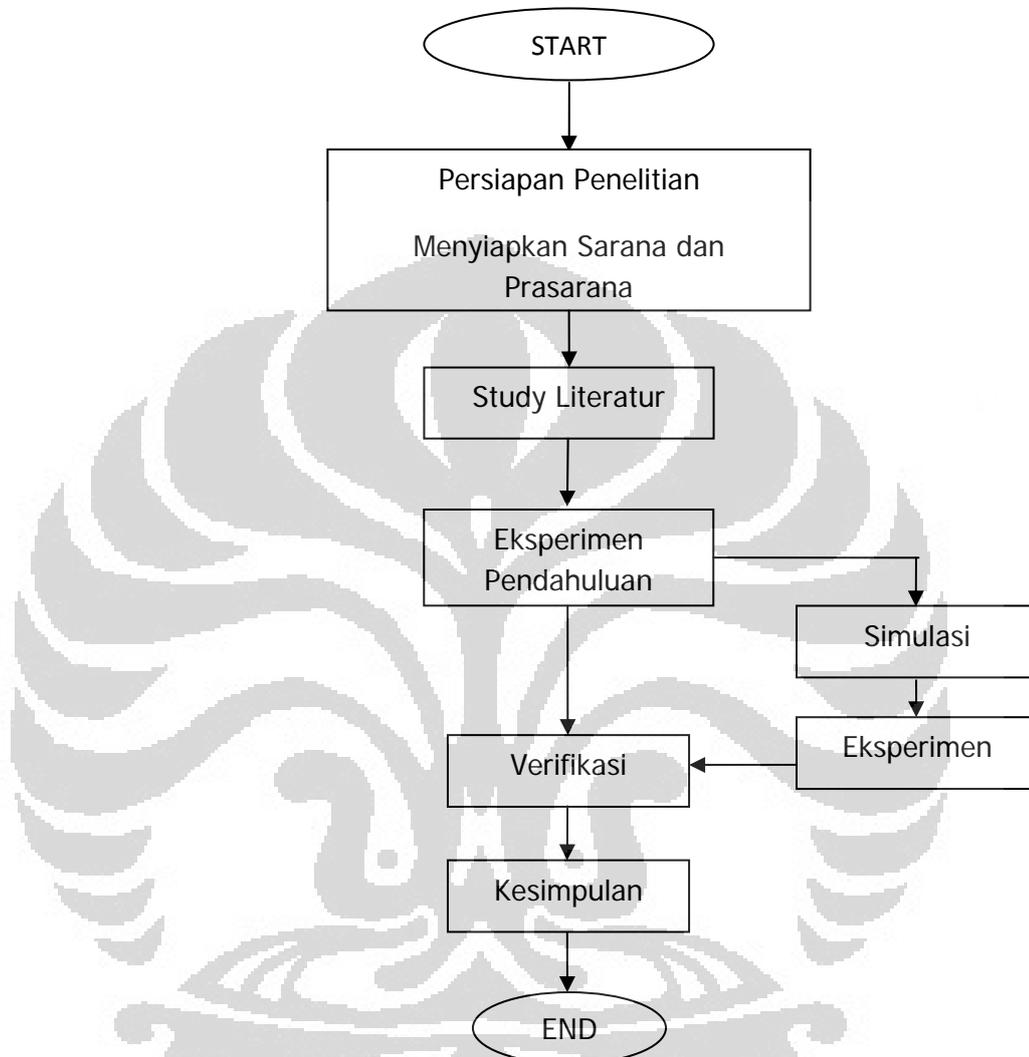
Adapun metode penelitian yang digunakan dalam skripsi ini yaitu mencari referensi pengering semprot. Selanjutnya adalah melakukan perancangan alat ukur kecepatan aliran udara (*orifice*) pengering semprot. Setelah melakukan perancangan alat ukur, kemudian dilakukan proses manufaktur dan menginstal alat ukur pada alat pengering semprot. Selanjutnya dilakukan tahapan eksperimen. Setelah dilakukan eksperimen, dilanjutkan dengan tahap analisa data eksperimen. Kemudian, menentukan parameter kesetimbangan energi sebagai masukan dalam simulasi CFD. Berdasarkan parameter dimensi, kesetimbangan energi, dan hasil eksperimen maka dilakukan simulasi CFD menggunakan software Fluent 6.3 dengan skala 1:1 untuk mengetahui laju pengeringan dari pengering semprot berdasarkan simulasi. Setelah melakukan simulasi, maka data dari simulasi dibandingkan dengan data eksperimen. Perbandingan data simulasi dan data eksperimen hanya dilakukan untuk eksperimen bahan uji air. Dari kedua data tersebut maka dibandingkan antara hasil analisa simulasi dan hasil eksperimen menggunakan *air heater* apakah terdapat persamaan yang signifikan terhadap kedua data tersebut. Jika terdapat persamaan yang signifikan maka hasil simulasi menggunakan *air heater* dapat digunakan untuk menghitung laju pengeringan.

3.1.1 Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian

Adapun objek penelitian ini adalah menghitung laju penguapan dari pengering semprot yang berada di Laboratorium Perpindahan Panas, Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Pengambilan data berupa suhu udara kering keluar ruang pengering, suhu udara basah keluar ruang pengering, laju bahan masuk ruang pengering, suhu udara keluar heater, tekanan udara pada *nozzle*, kecepatan aliran udara masuk ruang pengering, dan keadaan penampung produks. Pengambilan data dilakukan pada tanggal 25 November 2010 sampai dengan 26 Desember 2010.

3.1.2 Alur Kerangka Penelitian

Adapun alur kerangka penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir

3.1.3 Deskripsi Alat dan Bahan Uji

A. Deskripsi Alat

Peralatan yang digunakan dalam proses pengambilan data eksperimen pada pengering semprot (*spray drying*) adalah:

- Rangkaian Pengering Semprot.



Gambar 3.2 Rangkaian pengering semprot

Pada rangkaian pengering semprot terdiri dari beberapa komponen yaitu: *Blower, Orifice, Manometer, Pemanas udara (air heater), Ruang pengering (drying chamber), Feed tank, Pompa umpan, Nozzle atomizer, Kompresor, Filter udara dan Siklon.*

- Pengatur Tekanan (*FRL Pressure Regulator*)



Gambar 3.3 *Pressure regulator*

Sebagai alat untuk mengatur tekanan udara yang masuk ke *nozzle*, hanya memakai *filter* dan regulatornya saja.

- Pompa Fluida dan Adaptor DC



Gambar 3.4 Pompa fluida dan Adaptor DC

Pada sebelah kanan terdapat adaptor DC sebagai alat untuk mengatur tegangan yang masuk ke pompa (sebelah kiri), dengan cara demikian maka laju bahan dapat diatur.

- *Nozzle*



Gambar 3.5 *Nozzle*

Digunakan sebagai alat untuk mengabutkan bahan yang masuk ke ruang pengering.

- Bejana Pengukur Fluida



Gambar 3.6 Bejana Pengukur Fluida

Sebagai alat untuk mengukur laju bahan, dengan cara menghitung berapa penurunan bahan per waktu.

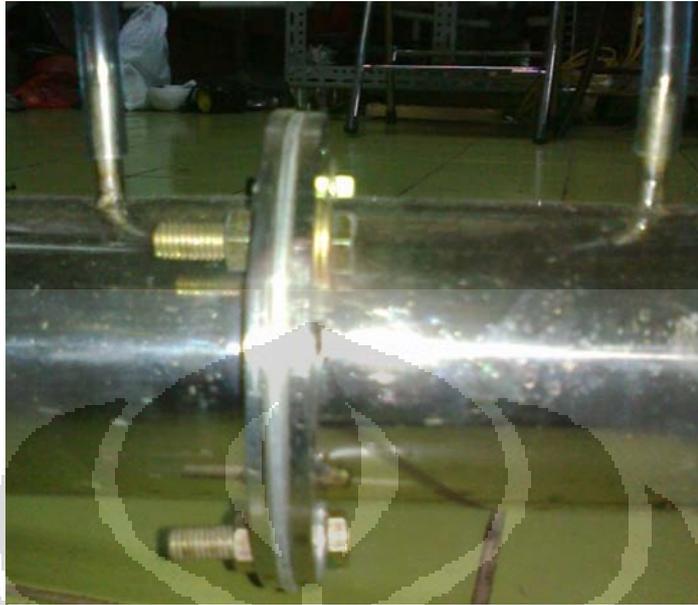
- *Blower*



Gambar 3.7 Blower

Blower digunakan untuk mengalirkan udara ke dalam pemanas listrik.

- *Orifice*



Gambar 3.8 *Orifice*

Orifis digunakan untuk mengukur kecepatan udara dari *blower*.

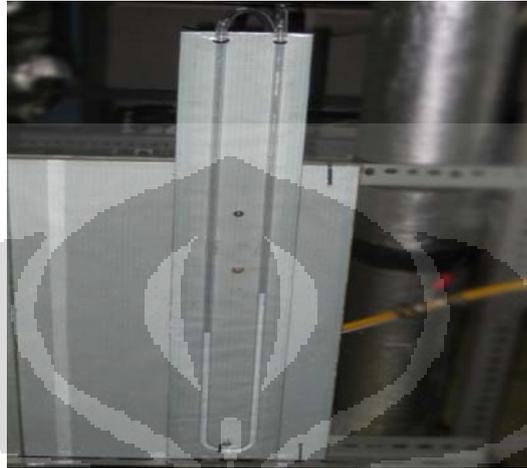
- Kotak Panel



Gambar 3.9 Kotak Panel

Kotak Panel digunakan sebagai terminal atau pusat kontrol dari pemanas listrik, disini kita dapat mengatur seberapa besar suhu udara yang keluar dari pemanas.

- Manometer



Gambar 3.10 Manometer

Manometer digunakan untuk mengetahui perbedaan tekanan pada aliran masuk orifis dengan tekanan aliran setelah orifis yang menghasilkan perbedaan ketinggian.

- Termometer Alkohol



Gambar 3.11 Termometer alkohol

Termometer ini digunakan untuk mengukur suhu udara kering dan suhu udara basah.

B. Bahan Uji

- Larutan Air dengan kandungan gula 2%. Persentase ini berdasarkan persentase massa gula terhadap jumlah massa fluida Air.



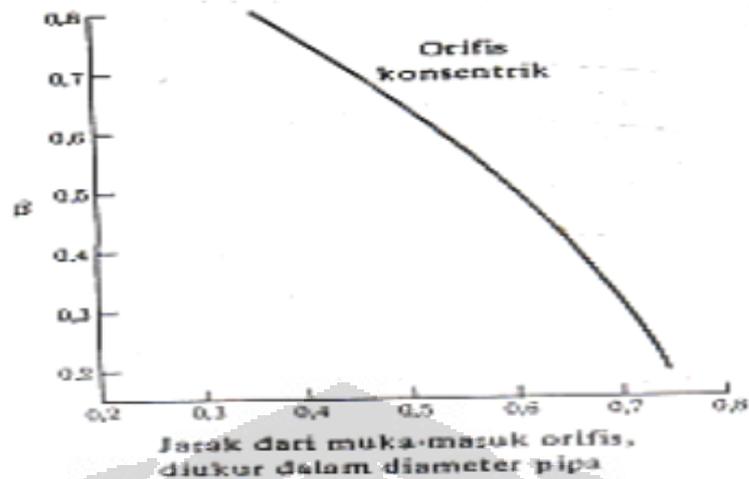
Gambar 3.12 Air kandungan gula 2%

- Air

3.2 Perancangan dan Perhitungan *Orifice*

3.2.1 Perancangan *Orifice*

Perancangan awal dimulai dengan memilih tipe dari pelat orifis yang akan digunakan. Ada beberapa macam tipe orifis seperti *cancentric*, *ecentric* dan *segmental*. Pelat orifis tipe *ecentric* dan *segmental* dipakai untuk mengukur kecepatan aliran yang mengandung bahan padat. Maka dipilih tipe *cancentric* dengan fluida udara. Tahapan selanjutnya adalah menentukan lokasi titik pengambilan tekanan.



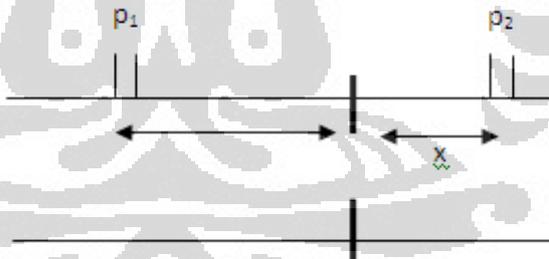
Gambar 3.13 Lokasi Pengambilan Tekanan untuk *orifice* dengan titik pengambilan tekanan pada vena kontrakta. (grafik J.P Holman)

- $\beta = 0.3$

$$\frac{D_2}{D_1} = 0.33$$

$$D_2 = 1 \text{ Incht}$$

- Penentuan letak titik lubang pengambilan tekanan pada aliran masuk dan keluar *orifice*.



Gambar 3.14 Lokasi yang disarankan untuk pengambilan tekanan pada *orifice* konsentrik, plat tipis, pinggir siku

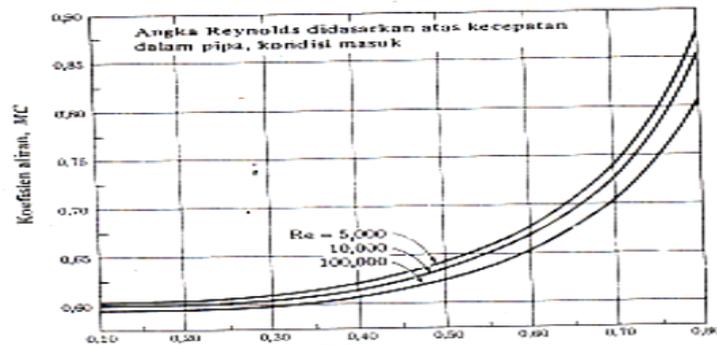
$$P_1 = 1 \times \text{Diameter pipa}$$

$$= 7,62 \text{ cm}$$

$$P_2 = \text{Untuk nilai } X = 0.7 \text{ Diameter pipa (grafik J.P Holman: 242).}$$

$$= 5,3 \text{ cm}$$

3.2.2 Perhitungan Laju Aliran Udara Masuk



Gambar 3.15 Koefisien buang untuk *orifice* konsentrik dalam pipa.
(grafik J.P Holman)

- Nilai Re

$$Re = \frac{\rho \times v_m \times D_1}{\mu} \quad (3.1)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{udara} \times g \times h}{\rho_{udara}}} \quad (3.2)$$

$$= 15.53 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{1.22 \times 15.53 \times 0.0762}{1.46 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 98.885,67$$

- Nilai K didapat dari grafik J.P Holman hal: 242

$$K = 0.59$$

- $K = MC$

$$\text{Dimana } M = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (3.3)$$

$$= 1,06$$

Dimana M = Faktor kecepatan masuk

C = Koefisien buang

K = koefisien aliran

- $\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$ (3.4)

$$= 1,22 \times 9,81 \times 15 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0,18 \text{ N/m}^2$$

$$0,18 = \frac{\mu_2^2}{2 \cdot g} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$$

$$\mu_2 = 0,67 \text{ m/s}$$

- $Q \text{ ideal} = A_2 \cdot \mu_2$ (3.5)

$$= 7,62 \cdot 10^{-2} \times 0,67 \text{ m/s}$$

$$= 183,79 \text{ m}^3/\text{s}$$

- $Q \text{ nyata} = Q \text{ ideal} \times C$ (3.6)

$$= 0,55 \times 183,79$$

$$= 102,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.3 Eksperimen Pengering Semprot

3.3.1 Set Up Alat Pengering Semprot

Set up alat dilakukan dengan tujuan untuk memastikan seluruh alat dapat berfungsi dengan baik saat melakukan pengujian. *Set up* alat selalu dilakukan sebelum pengujian dimulai. Berikut adalah tahapan setiap kali melakukan *set up* alat :

1. Instalasikan *orifice* pada sistem pengering semprot.
2. Sambungkan manometer *U-tube* ke *orifice*.
3. Posisikan termokopel pada sistem yang akan diukur temperaturnya.
4. Sambungkan selang dari bejana pengukur fluida ke pompa *booster* dan selanjutnya ke *nozzle*.
5. Hubungkan selang bertekanan dari kompresor ke FRL yang terhubung ke *nozzle*.
6. Sambungkan kabel-kabel untuk heater dan kontrol antara tabung *air heater* dengan *controller*-nya.
7. Sambungkan kabel blower ke inverter sebagai alat bantu untuk pengatur variasi laju udara masuk ke sistem.
8. Isi bejana pengukur dengan bahan uji hingga volume tertentu untuk memudahkan pengambilan data.

3.3.2 Prosedur Eksperimen Pengering Semprot

Dalam penelitian ini dibutuhkan daya yang besar untuk memanaskan udara dengan *air heater*. Proses pengambilan data dengan menggunakan bejana ukur untuk mengukur laju bahan masuk, termometer untuk mengukur suhu udara

kering dan basah keluar ruang pengering, manometer orifis untuk mengukur laju udara masuk, pengatur tekanan untuk mengukur tekanan masuk *nozzle*. Cara pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Masukkan kabel-kabel sumber daya untuk kompressor, blower, pompa booster, dan air *heater* pada sumber listrik PLN.
2. Hidupkan blower dan *air heater*, atur pada flow udara masuk dan temperatur pengujian yang diinginkan.
3. Hidupkan pompa booster untuk memompa bahan dan buka katup aliran ke *nozzle*.
4. Menyalakan kompresor dan mengatur tekanan dengan menggunakan pengatur tekanan.
5. Atur temperatur udara masuk melalui panel kontrol
6. Mengukur suhu udara kering dan basah keluar pengering utama.
7. Mengukur kecepatan aliran udara masuk melalui manometer yg terhubung ke *orifice*.
8. Mengukur kecepatan aliran fluida uji masuk melalui pembacaan pada bejana ukur.

3.4 Langkah Perhitungan Pengering Semprot

Dalam merancang pengering semprot ada beberapa perhitungan yang harus dilakukan antara lain perhitungan dimensi, energi dan efisiensi.

3.4.1 Kecepatan Udara di dalam ruang pengering Utama

Untuk mendapatkan kecepatan udara ke dalam pengering utama dapat menggunakan prinsip kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi berikut:

a) Kesetimbangan Massa

Solid masuk = Solid keluar

$$m_{pin} \cdot TS_1 = m_{pout} \cdot (1-TW_2)$$

$$m_{wout} = m_{pin} - m_{pout}$$

b) Kesetimbangan Energi

$$h_p = T (TS_1 \cdot C_p + (1 - TS_1) C_{pwater})$$

$$h_{pin} = T_{pin} (TS_1 \cdot C_{pp} + (1 - TS_1) \cdot C_{pwater})$$

$$h_{\text{pout}} = T_{\text{pin}} ((1-TW_2).C_{\text{pp}} + TW_2.C_{\text{pwater}})$$

$$\begin{aligned} h_{\text{air}} &= h_a + H_a h_{\text{wv}} \\ &= CT + H_a(C_{\text{wv}}T + h_{\text{gs}}) \end{aligned}$$

H_a = humidity ratio dari diagram psikrometrik

$$h_{\text{airin}} = C_{\text{pudara}} T_{\text{ud1}} + H_a(C_{\text{puap}}.T_{\text{ud1}} + \lambda)$$

$$h_{\text{airout}} = C_{\text{pudara}} T_{\text{ud2}} + H_a(C_{\text{puap}}.T_{\text{ud2}} + \lambda)$$

$$h_{\text{wv}} = C_{\text{puap}}.T_{\text{ud2}} + \lambda$$

Energi masuk = Energi keluar

$$m_{\text{pin}} h_{\text{pin}} + m_{\text{ain}} h_{\text{ain}} = m_{\text{pout}} h_{\text{pout}} + m_{\text{aout}} h_{\text{aout}} + m_{\text{wout}} h_{\text{wv}}$$

$$m_{\text{ain}} = m_{\text{aout}} = m_a$$

$$m_a = \frac{m_{\text{pout}} h_{\text{pout}} + m_{\text{aout}} h_{\text{aout}} - m_{\text{pin}} h_{\text{pin}}}{(h_{\text{ain}} - h_{\text{pout}})} \quad (3.7)$$

$$\text{Volume spesifik pada } T_{\text{ud2}} = v_p \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$\text{Laju udara panas } (m_{\text{udpanas}}) = m_a \cdot v_p \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$$

$$\text{Luas ruang pengering utama } (A_{\text{dryer}}) = \frac{m_a}{v_p} (D_{\text{dryer}})^2 \quad (\text{m}^2)$$

$$\text{Kecepatan udara di dalam ruang pengering utama } (V_{\text{udpanas}}) = m_{\text{udpanas}}/A_{\text{dryer}} \quad (\text{m s}^{-1})$$

3.4.2 Langkah Perhitungan Daya

Untuk menghitung daya total yang digunakan terlebih dahulu harus mendapatkan nilai dari daya pemanas (*power heater*) dan daya kalor untuk penguapan (*heat evaporated*). Berikut persamaan yang dapat digunakan ;

➤ Daya Pemanas

$$\text{Suhu dry bulb} = T_{\text{db1}} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{RH udara masuk} = w \quad (\%)$$

$$\text{Dipanaskan hingga} = T_{\text{db2}} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{Laju aliran udara} = m_{\text{air}} \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$$

$$\text{Humid volume} = v_p \quad (\text{m}^3 \text{ kg}^{-1})$$

$$\text{Humidity Ratio} = H \quad (\text{kg air/kg udara})$$

$$\text{Humid heat (Hs)} = 0.24 + 0.45H \quad (\text{kcal/kg } ^\circ\text{C})$$

$$\text{Daya Pemanas} = \frac{m_{\text{air}} \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{udara}}) H_v}{\eta_p} \quad (\text{kW}) \quad (3.8)$$

➤ **Kalor untuk Menguapkan**

$$\text{Kalor penguapan} = m_{\text{udara}} \times \lambda \quad (\text{kW})$$

$$\lambda = \text{kalor laten penguapan} \quad (\text{kJ/kg})$$

➤ **Total Energi untuk Udara**

$$\text{Total Energi} = \text{Daya Pemanas} + \text{Kalor Penguapan} \quad (\text{kW}) \quad (3.9)$$

3.5 Langkah Simulasi CFD Eksperimen Pengering Semprot

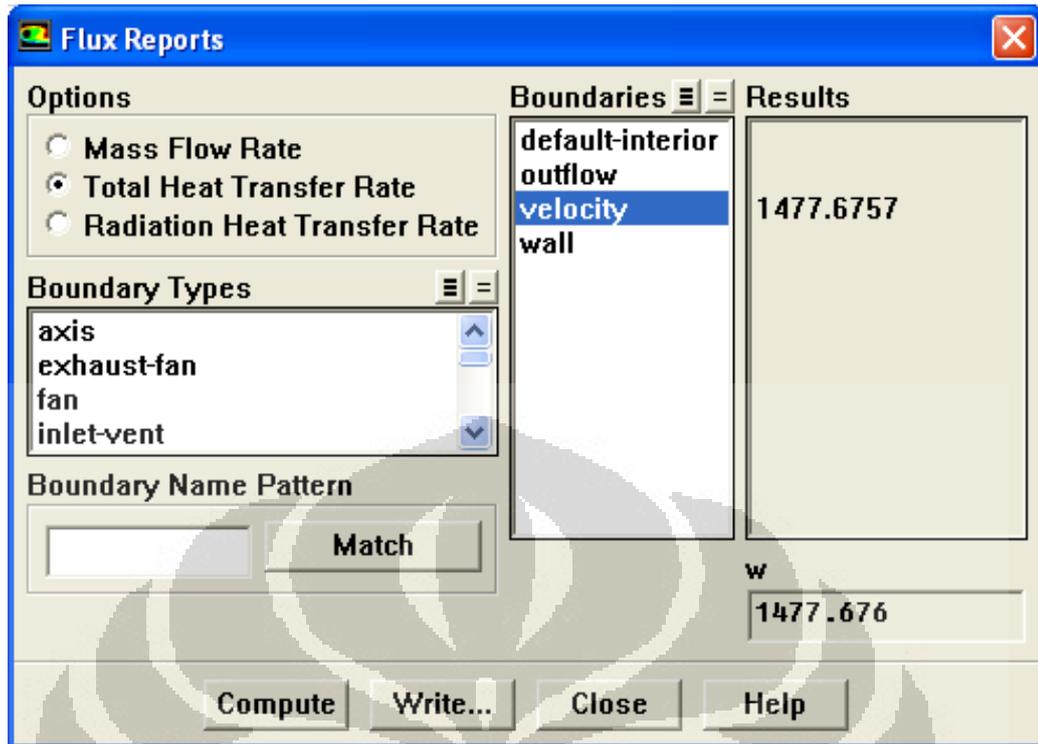
Simulasi CFD rancang bangun pengering semprot menggunakan software FLUENT 6.3.26 Untuk menggambar geometri dari rancang bangun pengering semprot digunakan software GAMBIT 6.2.1. Perbandingan geometri simulasi dengan benda sebenarnya adalah 1:1.

Sebelum melakukan simulasi CFD untuk ruang pengering utama, ada parameter-parameter yang harus diperhatikan antara lain:

Parameter Simulasi Perancangan

- Kecepatan udara masuk = V_{udara} (m/s)
- Suhu udara masuk = T_{udara1} (°C)
- Kelembaban udara masuk = H_1 (kg air/kg udara)
- Asumsi tidak ada panas yang keluar tabung (Adiabatik)
- Tipe *Nozzle*
- Jumlah partikel sekali semprot = n (partikel)
- Diameter droplet = D_o (mikron)
- Suhu bahan masuk = T_{bahan} (°C)
- Kecepatan bahan masuk = V_{bahan} (m/s)
- Sudut *Nozzle*
- Laju bahan masuk = m_{bahan} (kg/s)

Setelah melakukan simulasi CFD, untuk mengetahui laju pengeringan dapat dilihat dari Report → *Fluxes Report*



Gambar 3.16 Hasil laju pengeringan pada FLUENT

3.6. Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan data eksperimen adalah sebagai berikut:

3.6.1 Bahan Uji Air

A. Tahapan Perhitungan Kinerja Eksperimen Pada Bahan Air

Parameter perhitungan yang diambil:

$$T_{\text{out}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{lingkungan}} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{nyata}} = 193.2 \text{ m}^3/\text{jam} = 0.054 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Dengan } C_p = 1,005 \text{ kJ/kg K}$$

$$\text{Flow bahan} = 0,000167 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = (1.22 \times Q_{\text{nyata}}) / 3600 = 0,065 \text{ kg/s}$$

$$\text{Kinerja Sistem} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{Q} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\dot{m}_{\text{udara}} c_p \Delta T} \quad (3.10)$$

$$= \frac{0.000167}{0.065 \times 1.005 \times (50 - 28)} = 1,16 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \right)$$

B. Tahapan Perhitungan Kinerja Simulasi

Sebelum melakukan simulasi CFD untuk ruang pengering utama, ada parameter-parameter yang harus diperhatikan antara lain:

• Parameter Simulasi Perancangan

- V_{udara} (Kecepatan udara masuk) = 22.37 (m/s)
- Tin (Suhu udara masuk) = 50 ($^{\circ}C$)
- H_1 (Kelembaban udara masuk) = 0.018889 (kg air/kg udara)
- Asumsi tidak ada panas yang keluar tabung (Adiabatik)
- Tipe *Nozzle*
- Jumlah partikel sekali semprot = 50 (partikel)
- Suhu bahan masuk = 27 ($^{\circ}C$)
- Kecepatan bahan masuk = V_{bahan} (m/s)
- Sudut *Nozzle* = 13°
- \dot{m}_{bahan} (Laju bahan masuk) = 0.00016667 (kg/s)

Setelah melakukan simulasi CFD, ada beberapa data yang harus diambil dari hasil simulasi tersebut untuk menghitung kinerja antara lain didapatkan total *flow rate* (Q) pada simulasi didapatkan 1.47 watt sehingga didapat kinerjanya adalah:

$$\begin{aligned} \text{Kinerja} &= \frac{\dot{m}_{air}}{Q} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{udara} \cdot c_p \cdot \Delta T} = \frac{0.000167}{1.47} \\ &= 1.13 \times 10^{-4} \left(\frac{kg}{kJ} \right) \end{aligned}$$

3.6.2 Bahan Uji Larutan Air Gula 2%

Tahapan Perhitungan Kinerja Eksperimen

- Air dengan kandungan gula (2%)

Parameter perhitungan yang diambil:

$$T_{out} = 130^{\circ}C$$

$$T_{lingkungan} = 28^{\circ}C$$

$$Q_{nyata} = 198.27 \text{ m}^3/\text{jam} = 0.055 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Dengan } C_p = 1.005 \text{ kJ/kg K}$$

$$\text{Flow bahan} = 0.00025 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{udara} = (1.22 \times Q_{nyata}) / 3600 = 0.045 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Kinerja} &= \frac{\text{material}}{Q} = \frac{\text{material}}{\text{volume} \cdot \rho_p \cdot \Delta T} \\ &= \frac{0.00028}{0.043 \times 1.005 \times (130 - 28)} = 5,42 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \right) \end{aligned}$$

3.6.3 Perhitungan Daya Heater

$$\begin{aligned} \text{Suhu dry bulb (T db)} &= 28^\circ \text{C} \\ \text{RH} &= 78,63\% \\ \text{Dipanaskan hingga (Tin)} &= 50^\circ \text{C} \\ \text{Laju aliran udara (Q}_{\text{nyata}}) &= 0,053679807 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\ \text{Humid volume (v)} &= 0.943037 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \text{Humidity Ratio(H)} &= 0.018889 \text{ kg air/kg udara} \\ \text{Humid heat (Hs)} &= 0.24 + 0.45H \\ &= 0.2485 \text{ kkal/kg } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Power Heater} &= \frac{Q_{\text{nyata}} (T_{\text{in}} - T_{\text{db}}) H_s}{v} \\ &= \frac{0.053679807 (50 - 28) 0.2485 \cdot 4.2}{0.943037} \\ &= 0.712918 \text{ kW} \end{aligned}$$

- **Kalor untuk Menguapkan**

$$\begin{aligned} \text{Heat evaporated} &= \text{laju masukan bahan} \times \text{kalor laten penguapan} \\ &= 0.0001667 \text{ kg/s} \times 2.502 \times 10^3 \text{ kJ/kg} \\ &= 0.417 \text{ kW} \end{aligned}$$

- **Total Energi untuk Udara**

$$\begin{aligned} Q_{\text{in}} (\text{Total Energi}) &= \text{Power Heater} + \text{Heat evaporated} \\ &= 0.712917731 + 0.417 \\ &= 1.129917731 \text{ kW} \end{aligned}$$

DATA EKSPERIMEN PENGERING SEMPROT

Tabel 3.1 Data Air dengan tekanan Kompresor 1 Bar

Penguujian AIR										
Pump (3 Volt) - Comp (1 Bar)										
Flow Udara (m ³ /s)	Flow Bahan (m ³ /s)	Flow Bahan kg/s	Keluar heater (°C)	Dry Bulb (°C)	Wet Bulb (°C)	H1	H2	Laju Udara Kering(m ³ /jam)	Laju Penguapan (kg/s)	Kondisi
0.101552029	6.6667E-07	0.00066667	120	51	37					Wet
0.103034618	6.6667E-07	0.00066667	130	58	38	0.018889	0.034894	364.0481214	0.001974567	Dry
0.103034618	6.6667E-07	0.00066667	140	66	42	0.018889	0.044224	364.0481214	0.003125626	Dry
0.10376797	6.6667E-07	0.00066667	150	77	44	0.018889	0.046693	366.6392439	0.003454646	Dry
0.103034618	6.6667E-07	0.00066667	160	82	45	0.018889	0.048407	364.0481214	0.003641691	Dry
0.12916073	6.6667E-07	0.00066667	100	47	36					wet
0.12916073	6.6667E-07	0.00066667	110	56	37	0.018889	0.032909	456.3584715	0.002168261	Dry
0.158188941	6.6667E-07	0.00066667	90	47	35					Wet
0.158188941	6.6667E-07	0.00066667	100	48	36	0.018889	0.033663	558.9226975	0.002798383	Dry

Tabel 3.2 Data Air dengan tekanan Kompresor 1,5 Bar

Penguujian AIR										
Pump (3 Volt) - Comp (1.5 Bar)										
Konversi Satuan										
Flow Udara (m ³ /s)	Flow Bahan (m ³ /s)	Flow Bahan kg/s	Keluar heater (°C)	Dry Bulb (°C)	Wet Bulb (°C)	H1	H2	Laju Udara Kering(m ³ /jam)	Laju Penguapan (kg/s)	Kondisi
0.052248088	4.16667E-07	0.00041667	120	41	38					Wet
0.052248088	4.16667E-07	0.00041667	130	67	42	0.018889	0.043777	184.6060912	0.001557017	Dry
0.052248088	4.16667E-07	0.00041667	140	68	43	0.018889	0.046946	184.6060912	0.001755248	Dry
0.079810272	4.16667E-07	0.00041667	70	37	38			287.3169801		Wet
0.079810272	4.16667E-07	0.00041667	80	39	38	0.018889	0.043324	281.9904623	0.002335093	Dry
0.079810272	4.16667E-07	0.00041667	90	50	37	0.018889	0.035536	281.9904623	0.001590844	Dry
0.10593757	4.16667E-07	0.00041667	90	51	35					Wet
0.10376797	4.16667E-07	0.00041667	100	67	35	0.018889	0.022857	366.6392439	0.000493024	Dry
0.104496175	4.16667E-07	0.00041667	110	69	40	0.018889	0.036178	369.2121825	0.002163283	Dry
0.131488137	4.16667E-07	0.00041667	60	66	36					Wet
0.131488137	4.16667E-07	0.00041667	70	51	34	0.018889	0.027237	464.5818082	0.001314323	Dry
0.133207009	4.16667E-07	0.00041667	80	39	31	0.018889	0.02554	470.6550308	0.001060833	Dry
0.159620545	4.16667E-07	0.00041667	90	55	35					Wet
0.159620545	4.16667E-07	0.00041667	100	60	38	0.018889	0.034016	563.9809245	0.002891119	Dry
0.159620545	4.16667E-07	0.00041667	110	61	40	0.018889	0.036568	563.9809245	0.003378932	Dry

Tabel 3.3 Data Air dengan tekanan Kompresor 2 Bar

Penguujian AIR										
Pump (3 Volt) - Comp (2 Bar)										
Flow Udara (m ³ /s)	Flow Bahan (m ³ /s)	Flow Bahan kg/s	Keluar heater (°C)	Dry Bulb (°C)	Wet Bulb (°C)	H1	H2	Laju Udara Kering (m ³ /jam)	Laju Penguapan (kg/s)	Kondisi
0.05367981	1.66667E-07	0.00016667	40	27	26					Wet
0.05367981	1.66667E-07	0.00016667	50	38	28	0.018889	0.019939	189.664729	6.7489E-05	Dry
0.05367981	1.66667E-07	0.00016667	60	44	30	0.018889	0.021302	189.664729	0.000155128	Dry
0.05367981	1.66667E-07	0.00016667	70	49	31	0.018889	0.021259	189.664729	0.000152305	Dry
0.05367981	1.66667E-07	0.00016667	80	55	32	0.018889	0.020881	189.664729	0.000128036	Dry
0.07885443	1.66667E-07	0.00016667	50	28	27					Wet
0.07885443	1.66667E-07	0.00016667	60	35	30	0.018889	0.025161	278.6132092	0.000592204	Dry
0.07981027	1.66667E-07	0.00016667	70	37	31	0.018889	0.026404	281.9904623	0.000718186	Dry
0.07788685	1.66667E-07	0.00016667	80	56	33	0.018889	0.022719	275.1945127	0.000357229	Dry
0.10876307	1.66667E-07	0.00016667	40	28	26					Wet
0.10876307	1.66667E-07	0.00016667	50	37	28	0.018889	0.020365	384.2882234	0.000192194	Dry
0.11014864	1.66667E-07	0.00016667	60	39	30	0.018889	0.02344	389.1838121	0.000600204	Dry
0.11014864	1.66667E-07	0.00016667	70	43	31	0.018889	0.02382	389.1838121	0.00065037	Dry
0.1376858	1.66667E-07	0.00016667	40	30	27					Wet
0.1376858	1.66667E-07	0.00016667	50	39	28	0.018889	0.019514	486.4797652	0.000103039	Dry
0.1376858	1.66667E-07	0.00016667	60	43	30	0.018889	0.021729	486.4797652	0.000468152	Dry
0.1376858	1.66667E-07	0.00016667	70	49	31	0.018889	0.021259	486.4797652	0.000390653	Dry
0.16613833	1.66667E-07	0.00016667	40	33	27	0.018889	0.020227	587.0099575	0.000266116	Dry

Tabel 3.4 Data larutan Air gula 2% dengan tekanan Kompresor 1 Bar

Penguujian AIR+Gula (2%)										
Pump (3 Volt) - Comp (1 Bar)										
Flow Udara (m ³ /s)	Flow Bahan (m ³ /s)	Flow Bahan (Kg/s)	Keluar heater (^o C)	Dry Bulb (^o C)	Wet Bulb (^o C)	H1	H2	Laju Udara kering (m ³ /jam)	Laju Penguapan (Kg/s)	Kondisi
0.14148849	6.6667E-07	0.00066667	150	61	37	0.018889	0.030727	499.9156583	0.002005545	Dry
0.16522296	6.6667E-07	0.00066667	130	53	35					Wet
0.16522296	6.6667E-07	0.00066667	140	63	37	0.018889	0.029859	583.7757182	0.002170251	Dry
0.16522296	6.6667E-07	0.00066667	150	73	42	0.018889	0.041109	583.7757182	0.004395896	Dry

Tabel 3.5 Data larutan Air gula 2% dengan tekanan Kompresor 1,5 Bar

Penguujian AIR+Gula (2%)										
Pump (3 Volt) - Comp (1.5 Bar)										
Flow Udara (m ³ /s)	Flow Bahan (m ³ /s)	Flow Bahan (Kg/s)	Keluar heater (^o C)	Dry Bulb (^o C)	Wet Bulb (^o C)	H1	H2	Laju Udara Kering (m ³ /jam)	Laju Penguapan (Kg/s)	Kondisi
0.11014864	0.0000005	0.0005	120	50	32					Wet
0.108763068	0.0000005	0.0005	130	60	39	0.018889	0.037009	384.2882234	0.002359786	Dry
0.108763068	0.0000005	0.0005	140	80	42	0.018889	0.038026	384.2882234	0.002492231	Dry
0.108763068	0.0000005	0.0005	150	75	41	0.018889	0.036809	384.2882234	0.00233374	Dry
0.140412517	0.0000005	0.0005	110	46	35					Wet
0.140412517	0.0000005	0.0005	120	47	37	0.018889	0.036857	496.1139631	0.003020915	Dry
0.1376858	0.0000005	0.0005	130	56	39	0.018889	0.038781	486.4797652	0.003279447	Dry
0.16522296	0.0000005	0.0005	100	46	35					Wet
0.16522296	0.0000005	0.0005	110	50	36					Wet
0.16522296	0.0000005	0.0005	120	69	39	0.018889	0.033064	583.7757182	0.002804313	Dry
0.164302491	0.0000005	0.0005	130	76	41	0.018889	0.036372	580.5234605	0.003439482	Dry

Tabel 3.6 Data larutan Air gula 2% dengan tekanan Kompresor 2 Bar

Penguujian AIR+Gula (2%)										
Pump (3 Volt) - Comp (2 Bar)										
Flow Udara (m ³ /s)	Flow Bahan (m ³ /s)	Flow Bahan kg/s	Keluar heater (^o C)	Dry Bulb (^o C)	Wet Bulb (^o C)	H1	H2	Laju Udara Kering (m ³ /jam)	Laju Penguapan (Kg/s)	Kondisi
0.05507432	0.00000025	0.00025	100	42	34					Wet
0.05507432	0.00000025	0.00025	130	49	39	0.018889	0.041888	194.5919061	0.00151667	Dry
0.05507432	0.00000025	0.00025	140	52	39	0.018889	0.040553	194.5919061	0.001428633	Dry
0.05507432	0.00000025	0.00025	150	56	44	0.018889	0.056	194.5919061	0.002447286	Dry
0.08261148	0.00000025	0.00025	90	35	32					Wet
0.08261148	0.00000025	0.00025	100	55	32	0.018889	0.02088	291.8878591	0.000196945	Dry
0.11286877	0.00000025	0.00025	80	36	33					Wet
0.11286877	0.00000025	0.00025	90	49	34	0.018889	0.0281	398.7947362	0.001244894	Dry
0.14202342	0.00000025	0.00025	50	32	29					Wet
0.14202342	0.00000025	0.00025	60	39	29	0.018889	0.021433	501.8057053	0.000432555	Dry
0.14148849	0.00000025	0.00025	70	40	31	0.018889	0.025109	499.9156583	0.001053767	Dry
0.16975046	0.00000025	0.00025	50	31	29					Wet
0.16975046	0.00000025	0.00025	60	36	29	0.018889	0.022716	599.7725353	0.000777841	Dry

BAB 4

ANALISA HASIL EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD

4.1 Analisa Hasil Eksperimen dan Simulasi

4.1.1 Bahan Uji Air (H₂O)

Pada tahapan eksperimen terdapat beberapa parameter dan kondisi pengering semprot yang ada di Laboratorium Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Nilai-nilai parameter dan kondisi yang telah diketahui dalam eksperimen ini antar lain:

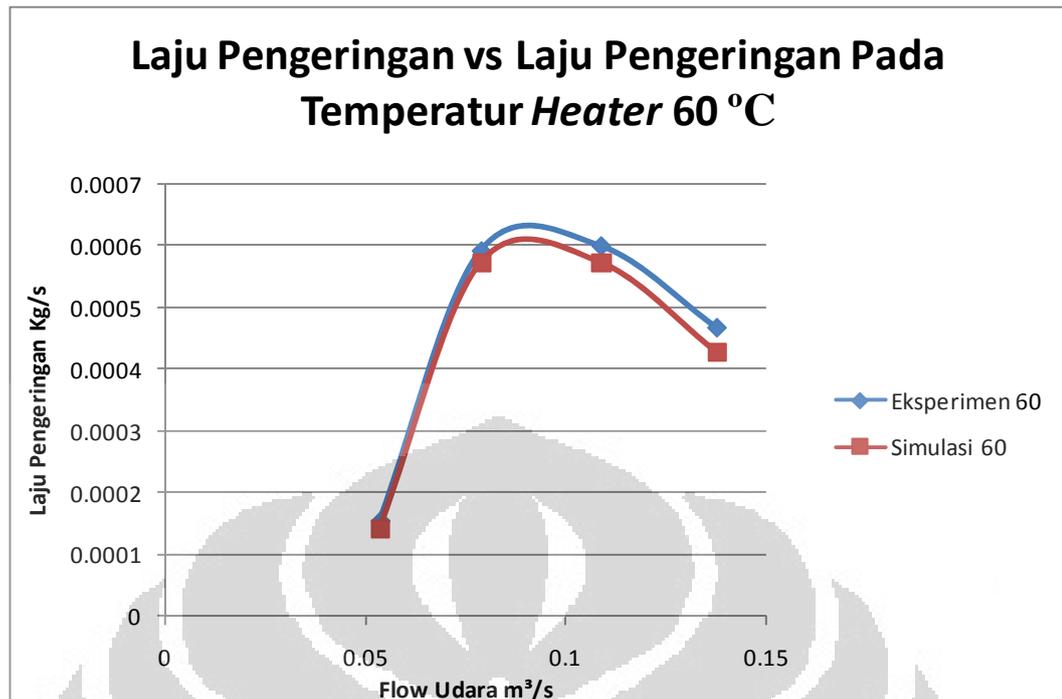
Tabel 4.1 Nilai Parameter Awal dan Kondisi Eksperimen

Parameter	Eksperimen
Diameter droplet	35 mikron
RH udara	78.627 %
Suhu Udara	40-150 °C
Flow Bahan Air	1,67x10⁻⁷ m³/s
Flow Bahan larutan Air Gula 2%	2,5x10⁻⁷ m³/s
Jumlah partikel sekali semprot	50
Bahan Uji	Air & Air+Gula (2%)
Tekanan udara masuk <i>nozzle</i>	1 – 2 bar

Tabel 4.2 Kinerja vs Flow udara pada Temperatur 60⁰C

Flow Udara m ³ /s	Temperatur °C	Laju bahan kg/s	Laju pengeringan	
			Eksperimen (kg/s)	Simulasi (kg/s)
0.05367981	60	0.00016667	0.000155128	0.000142028
0.07885443	60	0.00016667	0.000592204	0.000572771
0.10876307	60	0.00016667	0.000600204	0.000573182
0.1376858	60	0.00016667	0.000468152	0.000427939

Dari hasil simulasi dan perhitungan eksperimen diperoleh grafik berikut ini:



Grafik 4.1 Laju Pengeringan vs Flow Udara pada Bahan Air Temperatur Heater 60°C

Dari grafik didapat bahwa kurva laju penguapan eksperimen lebih besar dibandingkan kurva laju penguapan simulasi. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain :

1. Dalam perhitungan laju penguapan perancangan, suhu keluar dari ruang pengering diabaikan hanya kadar uap air keluar yang dihitung. Sehingga laju penguapan perancangan menjadi besar.

$$H_2 = \left(\frac{m_f \cdot W_f - m_g \cdot W_g}{m_{atr}} \right) + H_1 \quad (4.1)$$

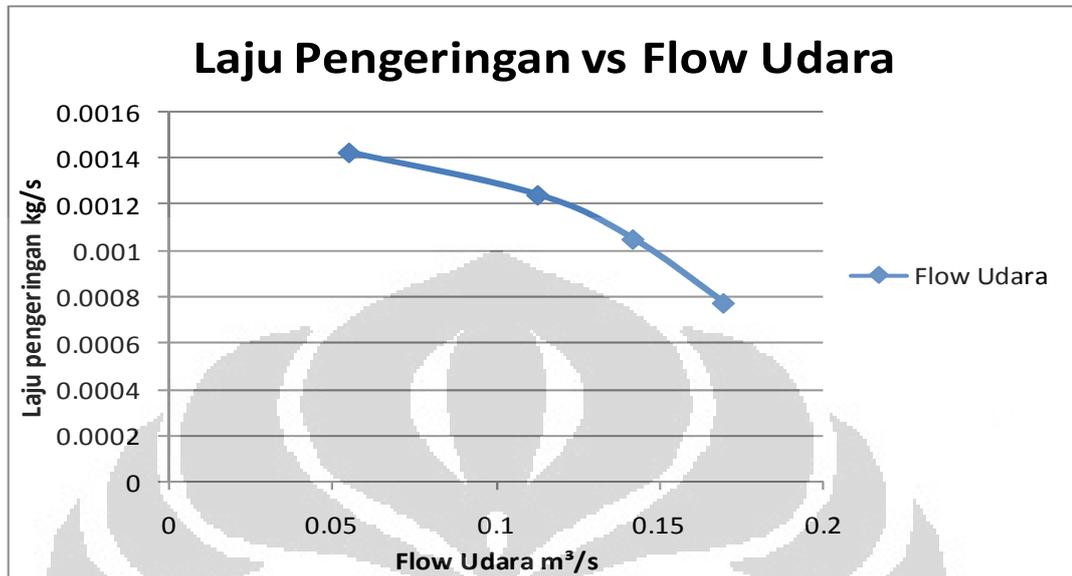
$$\text{Laju penguapan} = m_{dryatr} \cdot (H_2 - H_1) \left(\frac{\text{kg atr}}{\text{s}} \right) \quad (4.2)$$

2. Pada simulasi CFD, penulis tidak mengetahui rumus apa yang digunakan untuk menghitung kadar uap air yang keluar dari ruang pengering. Penulis mengambil data kadar uap air keluar dari *surface integral* untuk nilai kadar uap air di sisi keluar.

Pada grafik juga dapat dilihat perbandingan antara simulasi dan eksperimen memiliki kecenderungan yang sama. Ruang pengering mempunyai kapasitas panas yang berbanding lurus dengan flow udara sehingga perbedaan

antara suhu keluar udara dan suhu masuk udara dengan flow yang bervariasi mempunyai karakteristik yang hampir sama.

4.1.2 Bahan Uji Larutan Air kandungan Gula 2%



Grafik 4.2 Laju Pengeringan vs Flow Udara pada Bahan Larutan Air Gula 2%

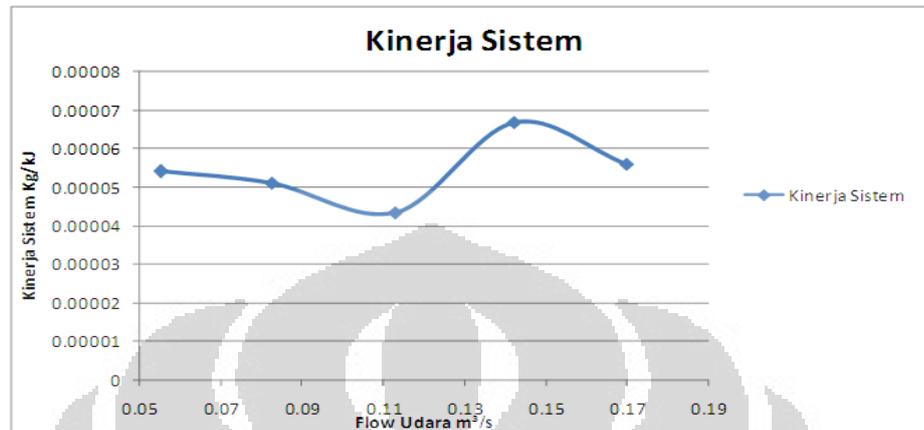
Dari grafik 4.2. didapat bahwa semakin besar flow udara yang masuk ke ruang pengering maka semakin kecil laju penguapannya. Ini dikarenakan jumlah bahan yang menguapkan semakin sedikit. Menurut hasil dari grafik di atas laju penguapan maksimal akan didapat pada flow 0.169 m³/s. Dari grafik didapat bahwa semakin besar flow udara yang masuk ruang pengering maka efisiensi sistem semakin kecil. Ini dikarenakan laju pengeringan semakin kecil dengan meningkatnya flow udara. efisiensi sistem berbanding lurus dengan laju pengeringan.

$$Efisiensi_{sistem} = \frac{(flow\ udara / Humid\ vol) \times (h_2 - h_3)}{(laju\ kering / humid\ vol) \times (h_2 - h_1)} \quad (4.3)$$

Pada saat flow udara semakin besar maka efisiensi semakin menurun. Ini dikarenakan dengan flow udara yang semakin besar dan luas permukaan udara masuk tetap maka kecepatan udara masuk akan semakin besar sehingga mengakibatkan terbuangnya partikel yang belum kering. Dikarenakan banyak partikel yang belum kering terbuang maka laju pengeringannya menjadi kecil sehingga efisiensi sistem menjadi turun.

4.2 Analisa Perbandingan Hasil Eksperimen Antara Air dan Larutan Air dengan kandungan Gula 2%

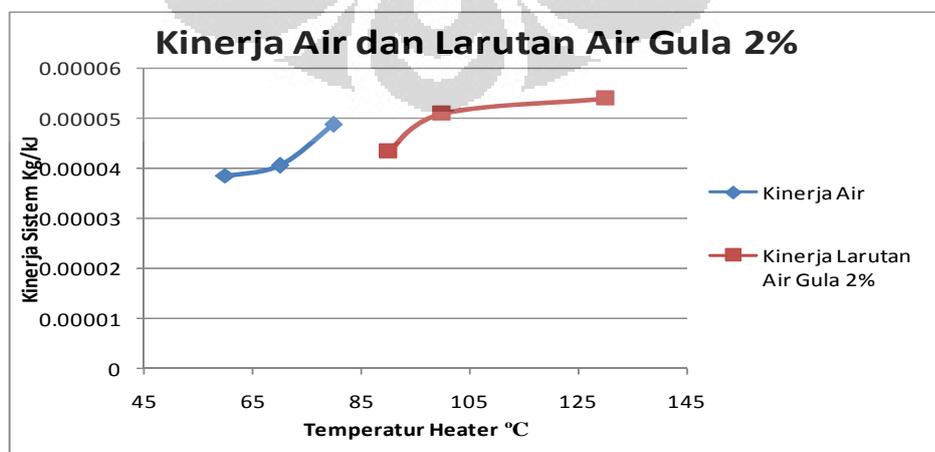
4.2.1 Kinerja Sistem Pengeringan Larutan Air Gula 2 %



Grafik 4.3 Kinerja Sistem

Dari grafik 4.3 didapat bahwa kinerja yang terbesar pada laju aliran udara 0.14 m³/s dan kinerja yang terendah pada flow udara 0.113 m³/s . kinerja tertinggi menunjukkan kinerja dari sistem yang kemampuan menghasilkan suatu produk (per satuan produk) dengan daya yang terkecil untuk mengeringkan produk tersebut. Jadi untuk kondisi kinerja tersebut juga menunjukkan kondisi optimum dari sistem pengering semprot untuk digunakan sebagai pengering larutan air dengan kandungan Gula 2%, terutama untuk penggunaan pengering semprot di daerah Depok.

4.2.2 Analisa Perbandingan Antara Kinerja Sistem Pengeringan Air dan Larutan Air Gula 2 %



Grafik 4.4 Perbandingan Kinerja Sistem Pada Air dan Larutan Air Gula 2 %

Tabel 4.3 Perbandingan Kinerja Sistem

Temperatur (Gula 2%)°c	Kinerja Kg/kJ	Temperatur Air °c	Kinerja Kg/kJ
130	5.40237E-05	80	4.86977E-05
100	5.10224E-05	70	4.05522E-05
90	4.33679E-05	60	0.000038565

Dari grafik 4.4 dan tabel 4.3, didapat bahwa pada kondisi besar laju udara dan tekanan kerja *nozzle* yang sama, bahan uji Air dapat dikeringkan dengan temperatur yang lebih rendah dari pada larutan Air gula 2%. Demikian juga halnya dengan perbandingan nilai kinerja dari sistemnya. Pada kondisi yang sama untuk mengeringkan air hanya membutuhkan daya pengeringan yang lebih kecil dari pada yang dibutuhkan untuk mengeringkan larutan air gula 2%.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil eksperimen dan simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari perbandingan antara data eksperimen dan simulasi didapat laju penguapan yang hampir sama. Semakin tinggi laju aliran udara maka laju penguapan semakin kecil.
2. Kinerja terbaik sistem pengering semprot untuk pengeringan Air pada flow bahan $1,67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan tekanan kompresor 2 bar adalah pada kecepatan aliran udara masuk $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, dan temperatur udara keluar pemanas 50°C
3. Kinerja terbaik sistem pengering semprot untuk larutan Air gula 2%, flow bahan $2,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan tekanan kompresor 2 Bar adalah pada kondisi kecepatan aliran udara masuk $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, dan temperatur udara keluar pemanas 60°C .

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Alat untuk mengatur laju bahan masuk sebaiknya menggunakan pompa peristaltik yang mempunyai laju bahan yang rendah sehingga tidak dibutuhkan bejana ukur.
2. Alat ukur suhu sebaiknya menggunakan alat ukur suhu digital sehingga kesalahan pengukuran dapat diperkecil.
3. Menggunakan kompresor sebaiknya satu unit untuk melayani satu mesin pengering semprot untuk menjaga agar tekanan yang masuk menuju *nozzle* tetap (stabil) selama operasional pengering semprot (*spray dryer*).

DAFTAR ACUAN

- [1] Arun S. Mujumdar dan Sakamon Devahastin .Chapter 1: Fundamental principle of drying.
- [2] Birchal V. S., dan Passos M. L. Brazilian Journal of Chemical Engineering. Vol. 22, No. 02, pp. 293 - 302, April - June, 2005.
- [3] Cengel, Yunus A., Michael A. Boles, “Thermodynamics an Engineering Approach Fourth Edition International Edition”, McGraw-Hill, 2002. Third-Edition. Hal.211-212.
- [4] Chakraverty,A., dan D. S. De. *Post Harvest Technology of Cereals and Pulses*, Oxford and IBH Publishing Co, 1981, Chapter 2 : Psychrometry
- [5] Iva Filkova´, Li Xin Huang, and Arun S. Mujumdar.Chapter 10: Industrial Spray Drying Systems.
- [6] Modeling and simulation of milk emulsion drying in spray drying .
- [7] Moran, Michael J., Howard N. Shapiro, “Termodinamika Teknik”, Edisi ke Empat, Jilid 2. Erlangga: Jakarta, 2004.
- [8] "Pengeringan Butiran Jagung Tipe *Deep-Bed*: Pemodelan dan Simulasi”, *Prosiding Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo 1999*, Teknik Kimia ITB Bandung, hal. pp. VI.47-VI.54, (1999).
- [9] Supriono. (2003).Mengukur faktor faktor dalam proses pengeringan.
- [10] Treybal, R.E., *Mass Transfer Operations*, McGraw-Hill, 1981, Chapter: Humidification and Drying.

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A., *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, pp. 597–602, 1993.
- Ben-Dor, G., dkk., *Numerical Analysis of The Effects of Temperature and Concentration Jumps on Transient Evaporation of Moderately Large ($0.01 \leq Kn \leq 0.3$) Droplets in Non-isothermal Multicomponent Gaseous Mixtures*, *Journal of Heat and Mass Transfer*, 39, 157-166, 2003.
- Chen, X. D., Sean X.Q. Lin A, Guohua Chen b, *On The Ratio of Heat to Mass Transfer Coefficient for Water Evaporation and Its Impact Upon Drying Modeling*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp. 4369–4372, 2002.
- Fisenko *S.P., Brin, A.A., Petruichik, A.I, *Evaporative Cooling of Water in a Mechanical Draft Cooling tower*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 165–177, 2004.
- Holman, J.P., *Heat Transfer*, fourth ed., McGraw-Hill, Tokyo, pp. 434–435, 1976.
- Incropera, F.P., De Wit, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, third ed., Wiley, New York, pp. 360–364, 1990.
- Kosasih E.A., *Akibat Penerapan Analogi Perpindahan Massa dan Perpindahan Panas untuk Permukaan Sferik serta Simulasi Pengujian*, Seminar Terbatas Departemen Teknik Mesin, 2004.
- Kosasih E.A.¹, M. I. Alhamid¹, *Heat and Mass Transfer in Water Droplet Evaporation: A New Approach on Film Stagnant Model. Proceedings of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2006© FTEC 2006 Jakarta, Indonesia, December 10 – 14, 2006*
- Lectures And Workshop Exercises On Drying Of Agriculture And Marine Products: Regional Workshop On Drying Technology. A project activity of

the ASEAN SubCommittee on Non-Conventional Energy Research. Jakarta: Indonesia Institute of Sciences Press 2003.

Mujumdar, A. S., *Innovation in Thermal Drying Technologies and Future R&D Needs*, The 14th International Symposium on Transport Phenomena, 6-9 July 2003, Bali, Indonesia.

Mujumdar, A. S., *Handbook of Drying Technology*, vol. 1, second ed., Marcel Dekker Inc., New York, 1995.

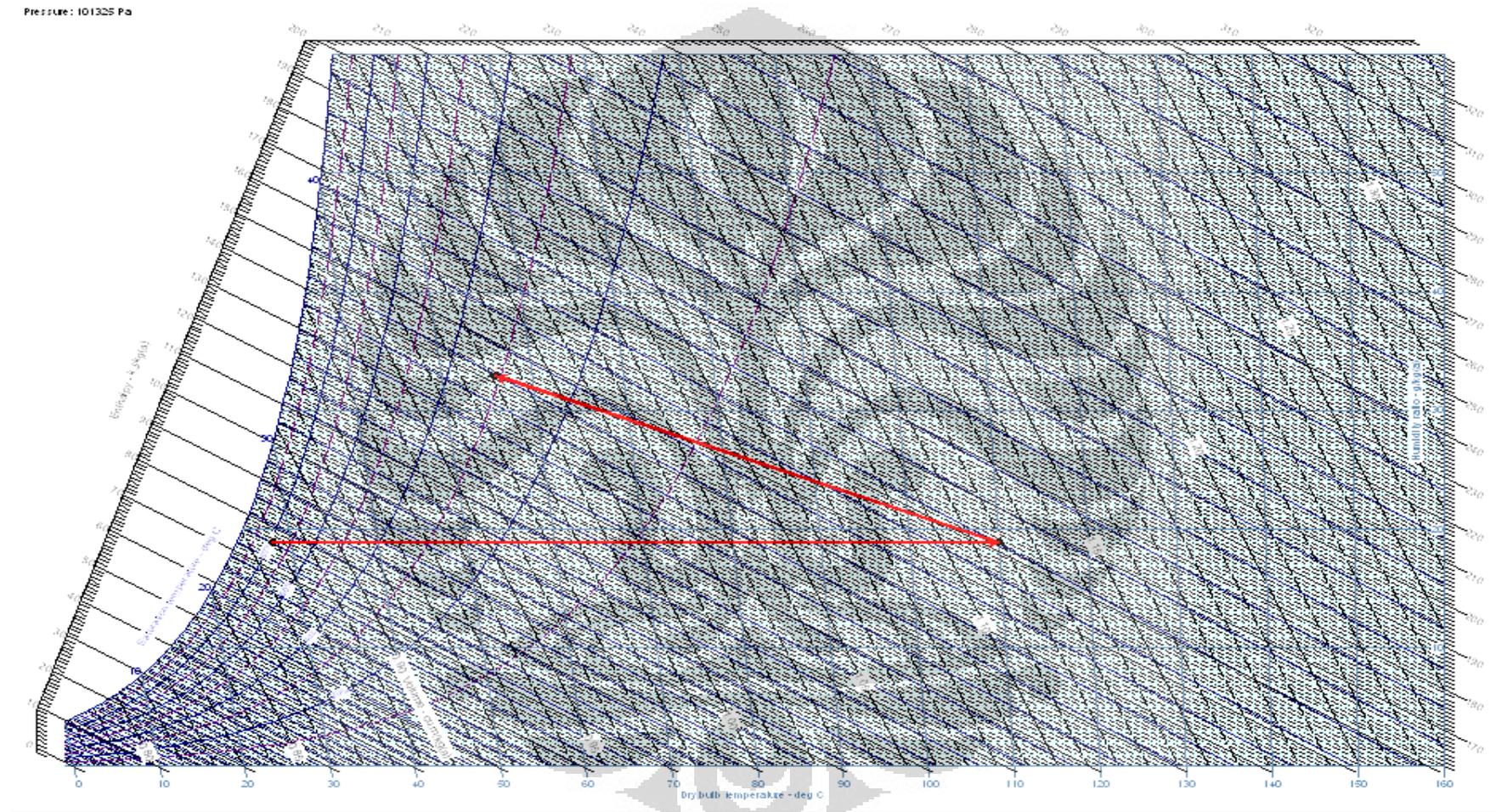
Silva, M. A., Nebra, S. A., *Numerical Simulation of Drying in A Cyclone*, Journal of Drying Technology, 15(6-8), 1731-1741, 1997.

Walton, D. E., *The Evaporation of Water Droplets. A Single Droplet Drying Experiment*, Journal of Drying Technology, 22(3), pp. 431-456, 2004.

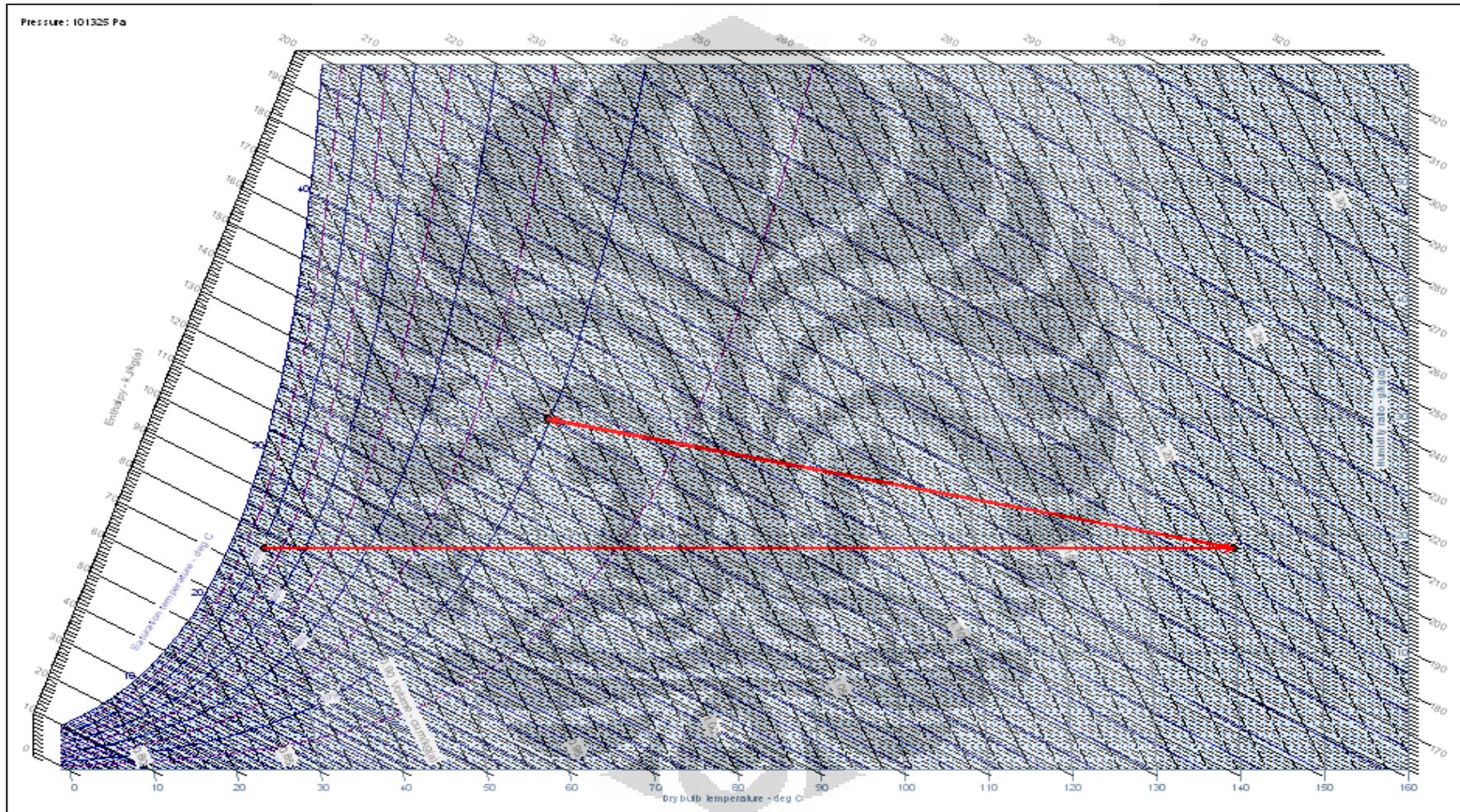
Welty, James.R., dkk , *Dasar-dasar Fenomena Transport*, Vol 2 &3, edisi ke-4, Jakarta: Erlangga, 2002.

DTM FTUI, *Buku penuntun praktikum mesin* (Depok: 2005)

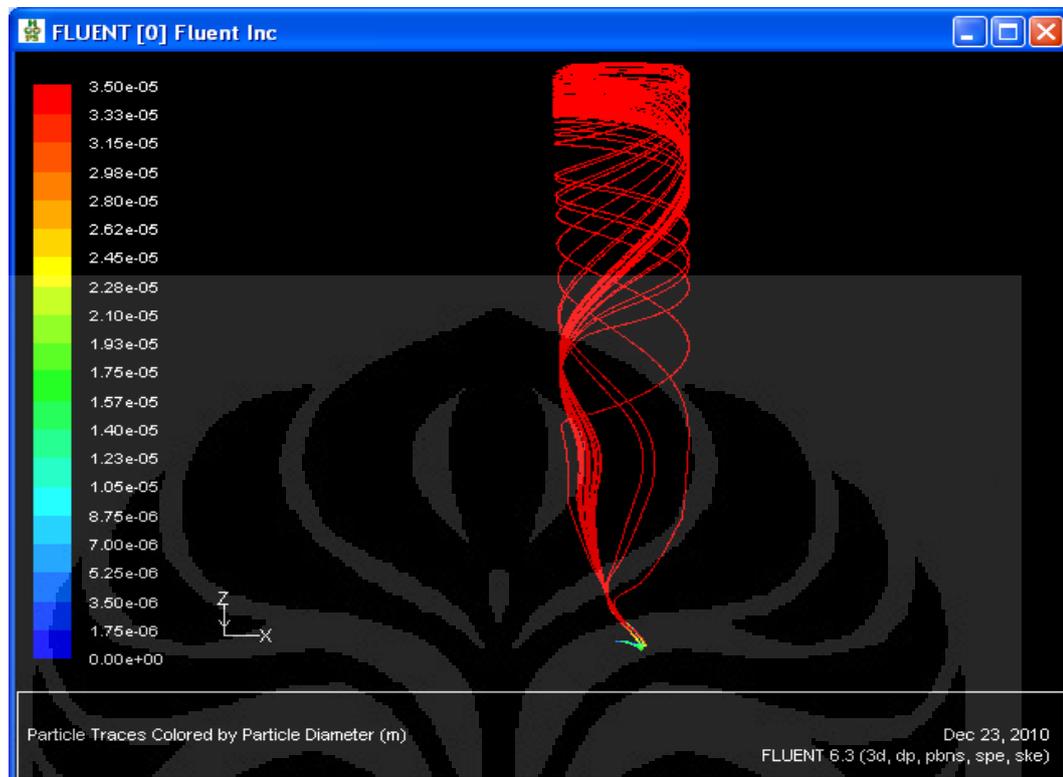
Lampiran 1. Diagram Psikrometrik udara untuk Eksperimen Bahan Air



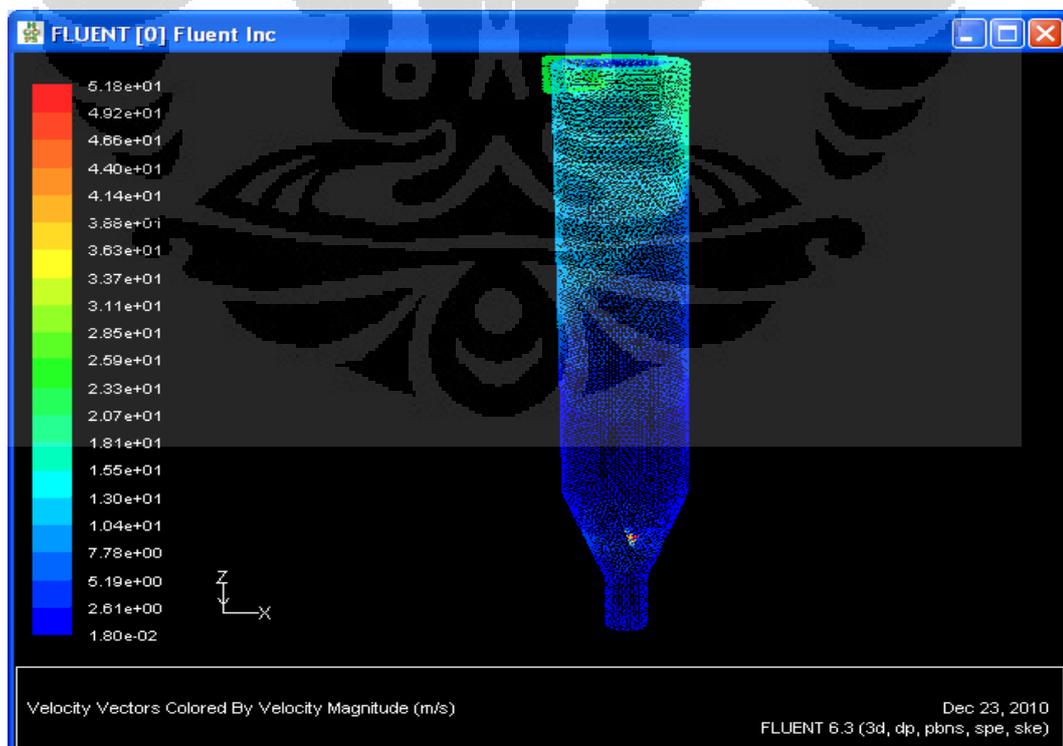
Lampiran 2. Diagram Psikrometrik udara untuk Eksperimen Bahan AIR dengan kandungan Larutan Gula (2%)



Lampiran 3. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 193,25 m³/jam, Temperatur 50⁰C

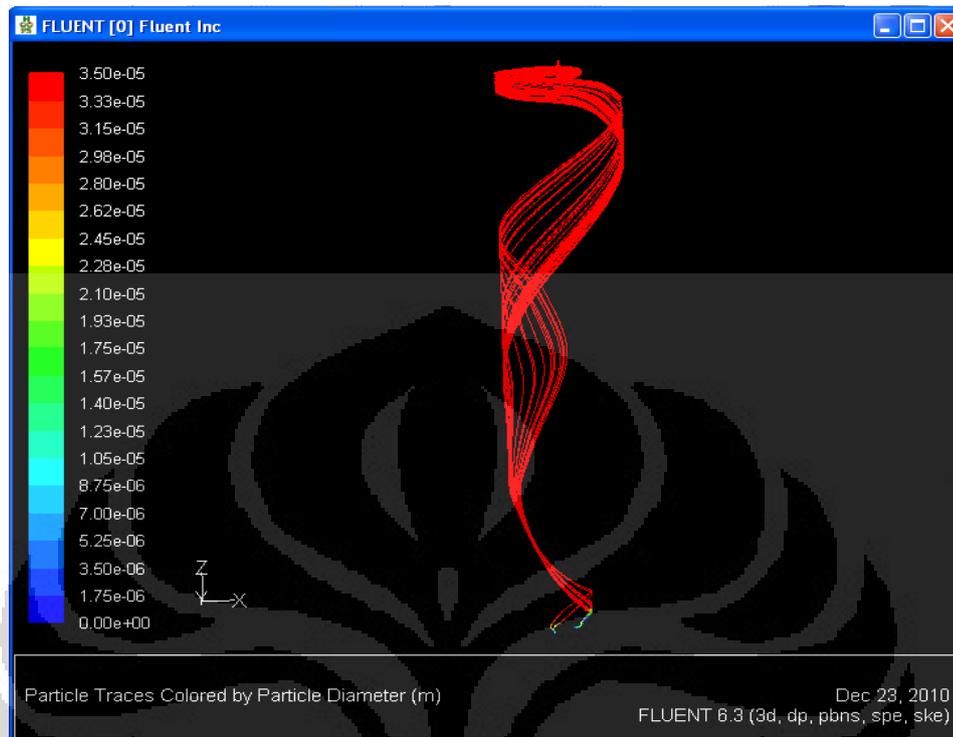


Perubahan diameter partikel pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 50⁰C

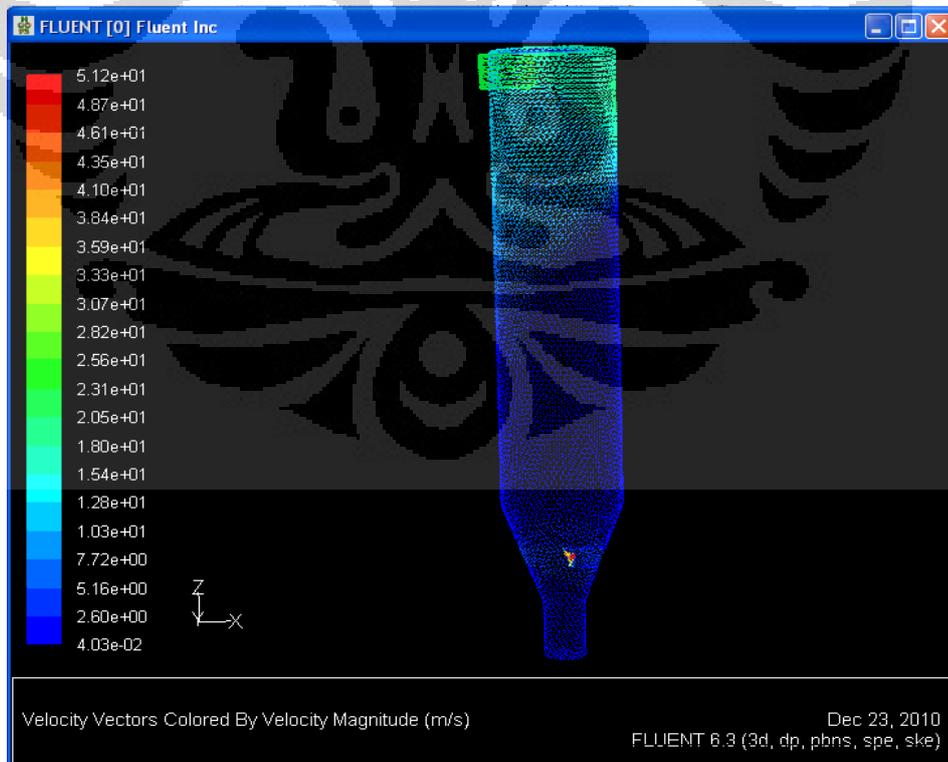


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 50⁰C

Lampiran 4. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 193,25 m³/jam, Temperatur 60⁰C

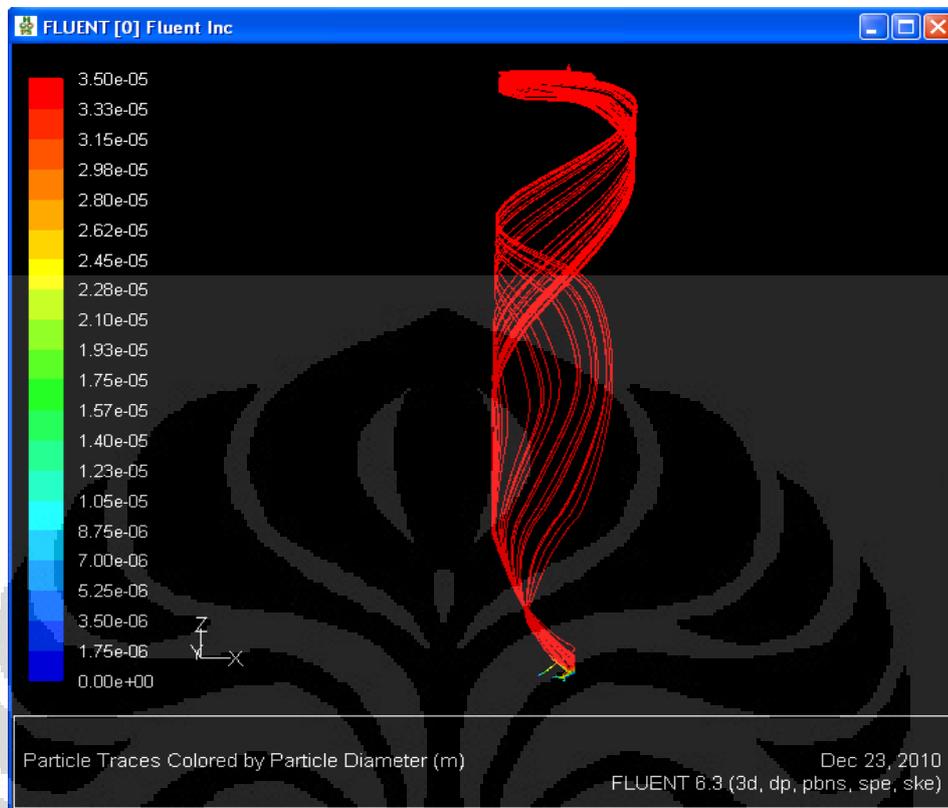


Perubahan diameter partikel pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 60⁰C

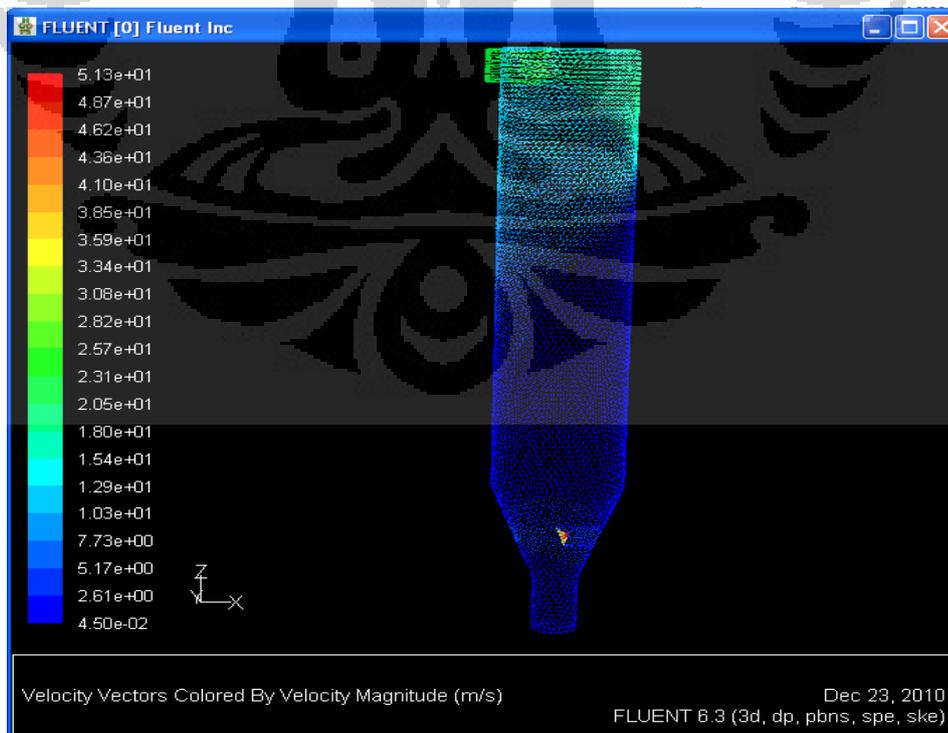


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 60⁰C

Lampiran 5. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 193,25 m³/jam, Temperatur 70⁰C

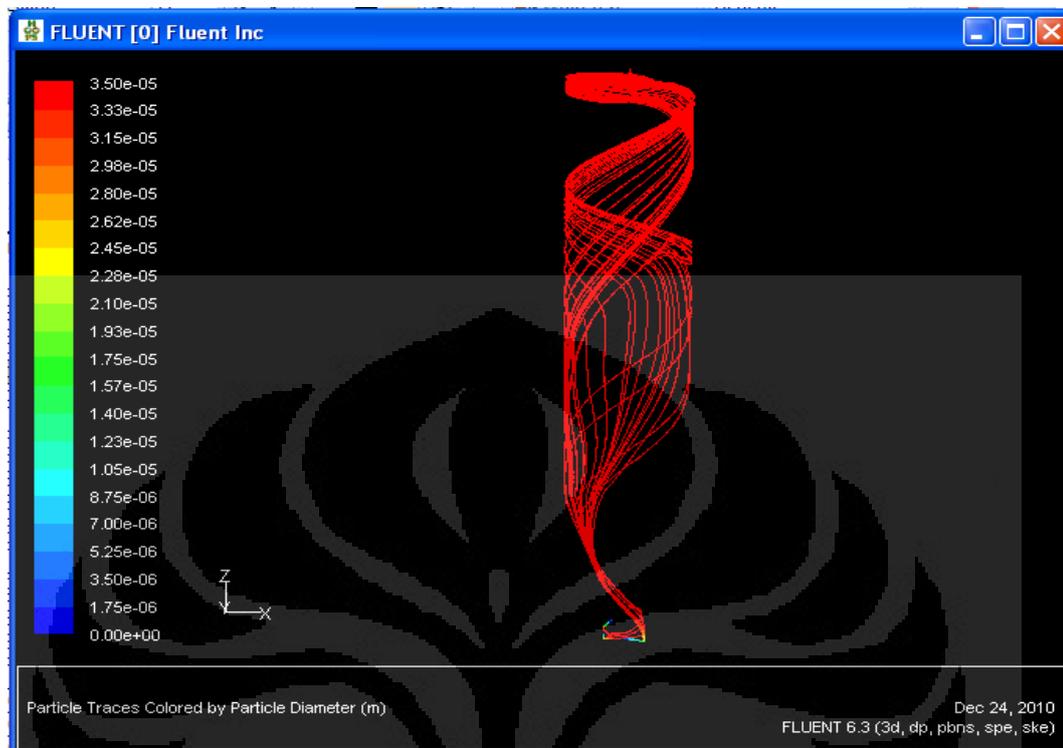


Perubahan diameter partikel pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 70⁰C

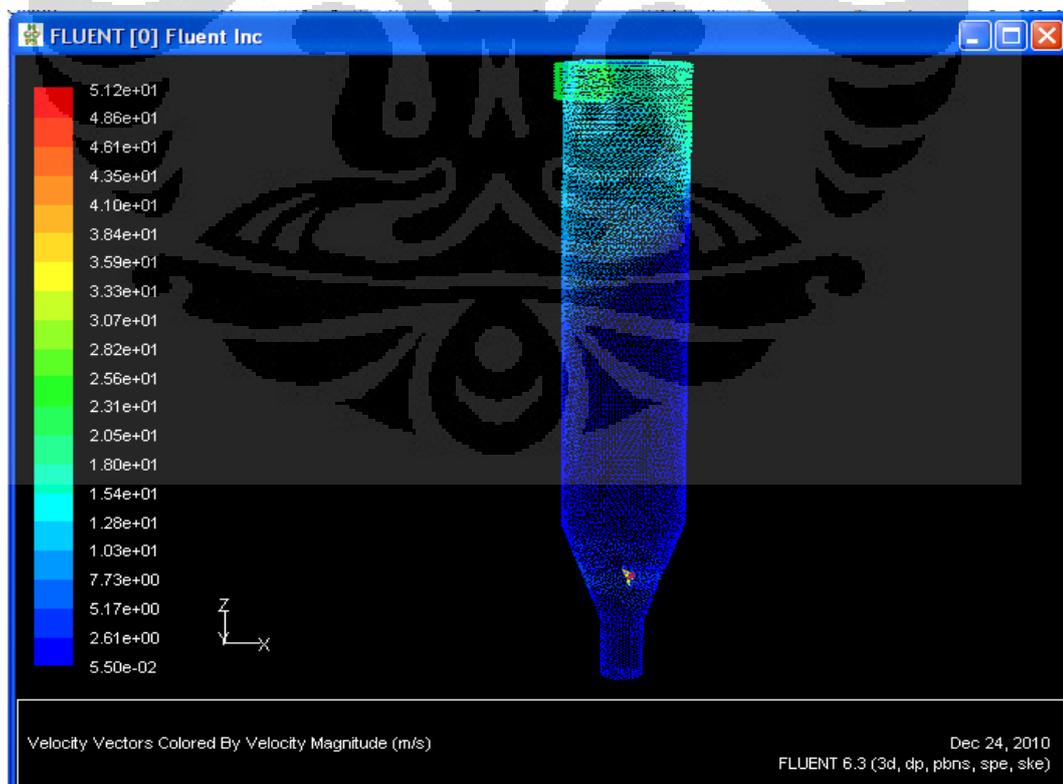


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 70⁰C

Lampiran 6. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 193,25 m³/jam, Temperatur 80⁰C

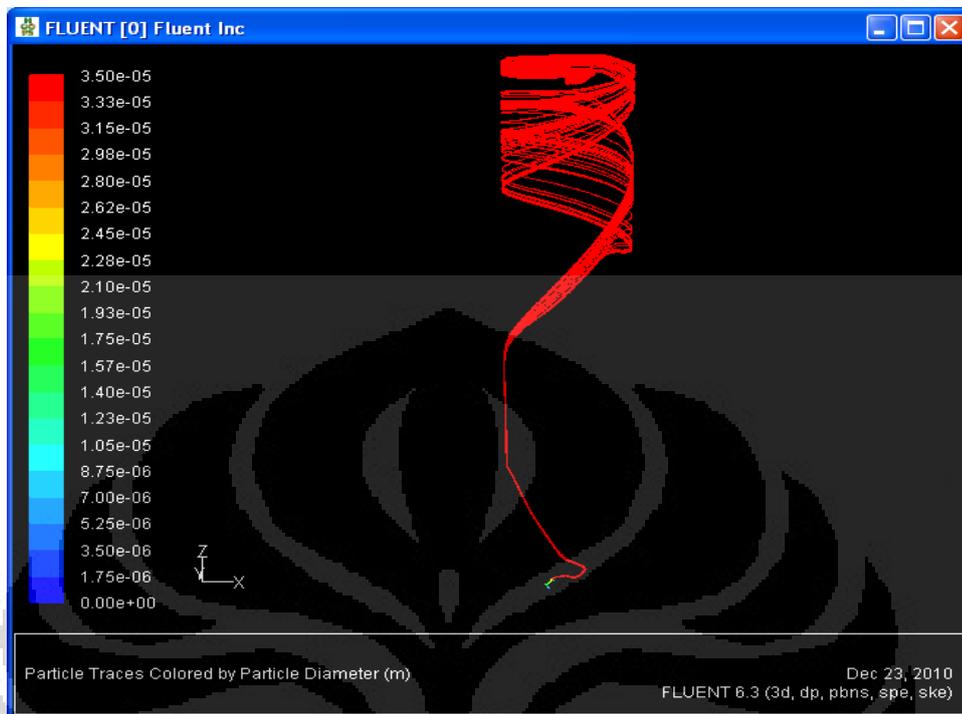


Perubahan diameter partikel pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 80⁰C

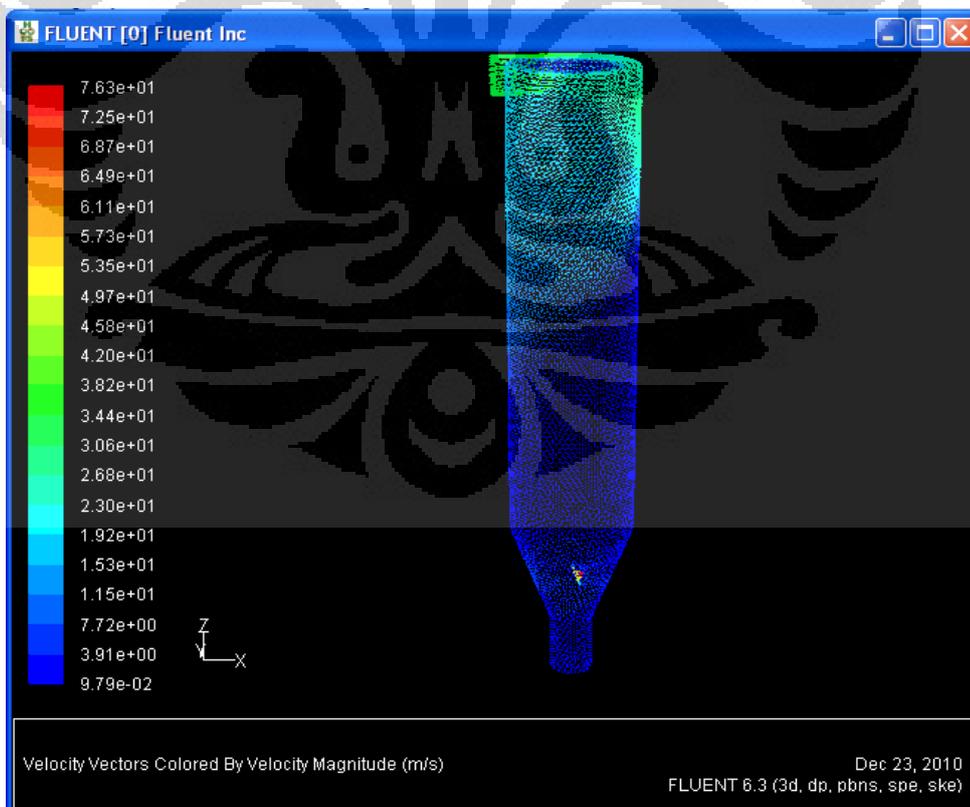


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 193,25 m³/jam, Temperatur 80⁰C

Lampiran 7. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 283,876 m³/jam, Temperatur 60⁰C

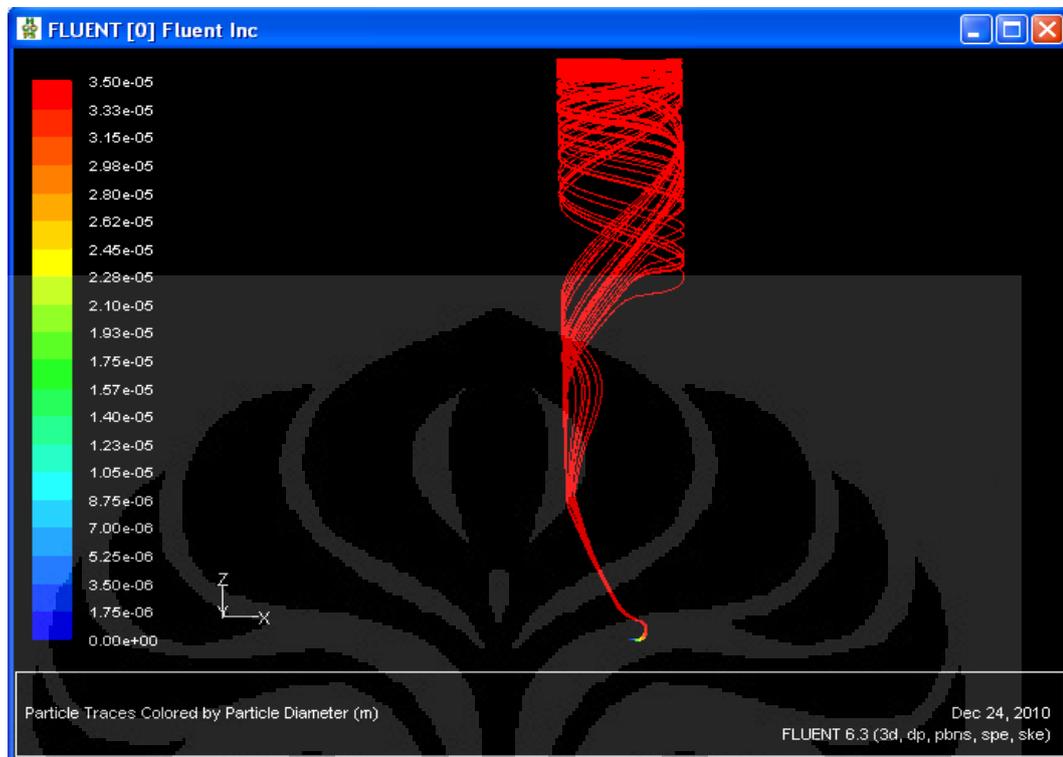


Perubahan diameter partikel pada flow udara 283,876 m³/jam, Temperatur 60⁰C

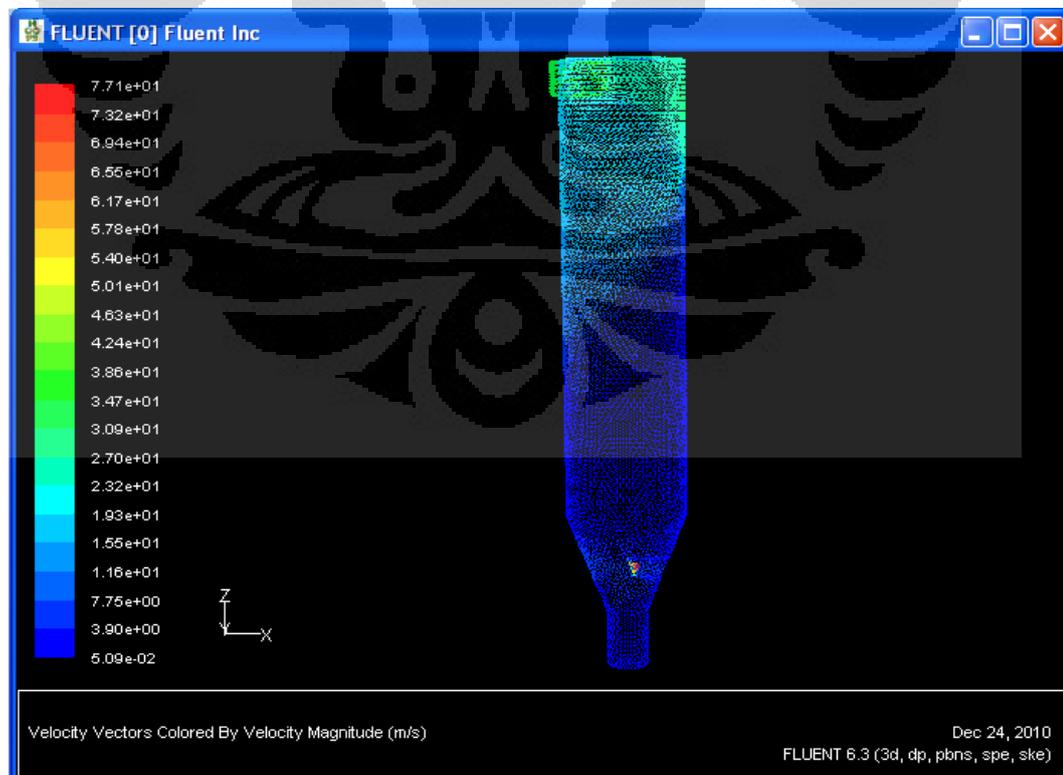


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 283,876 m³/jam, Temperatur 60⁰C

Lampiran 8. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 283,876 m³/jam, Temperatur 70⁰C

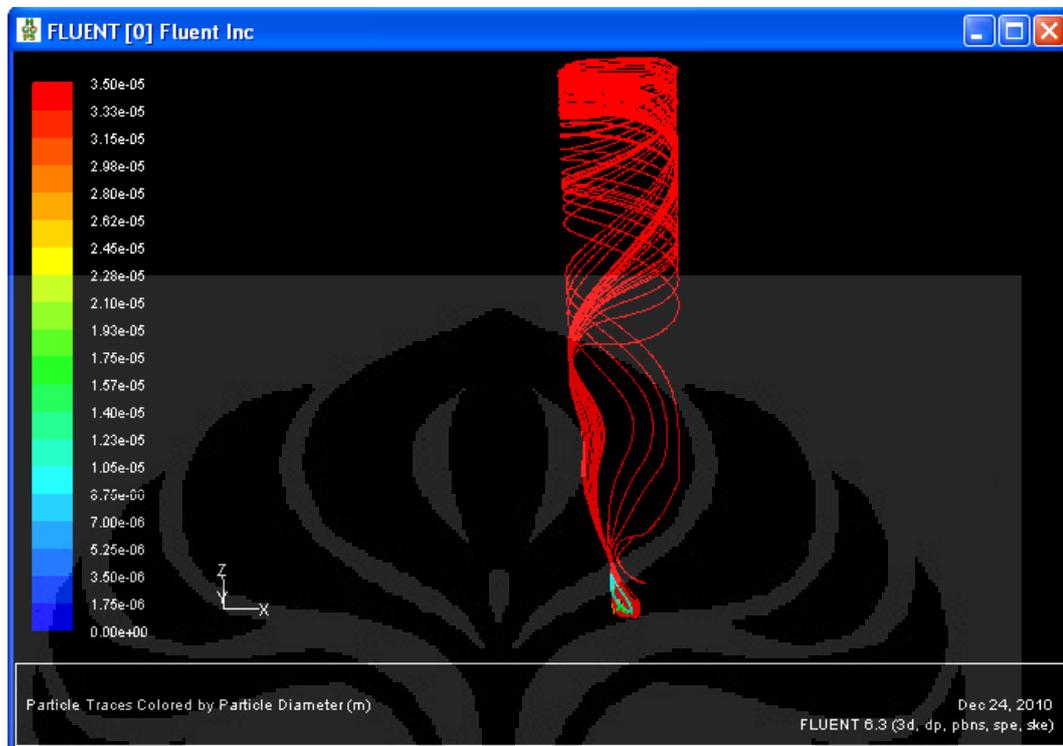


Perubahan diameter partikel pada flow udara 283,876 m³/jam, Temperatur 70⁰C

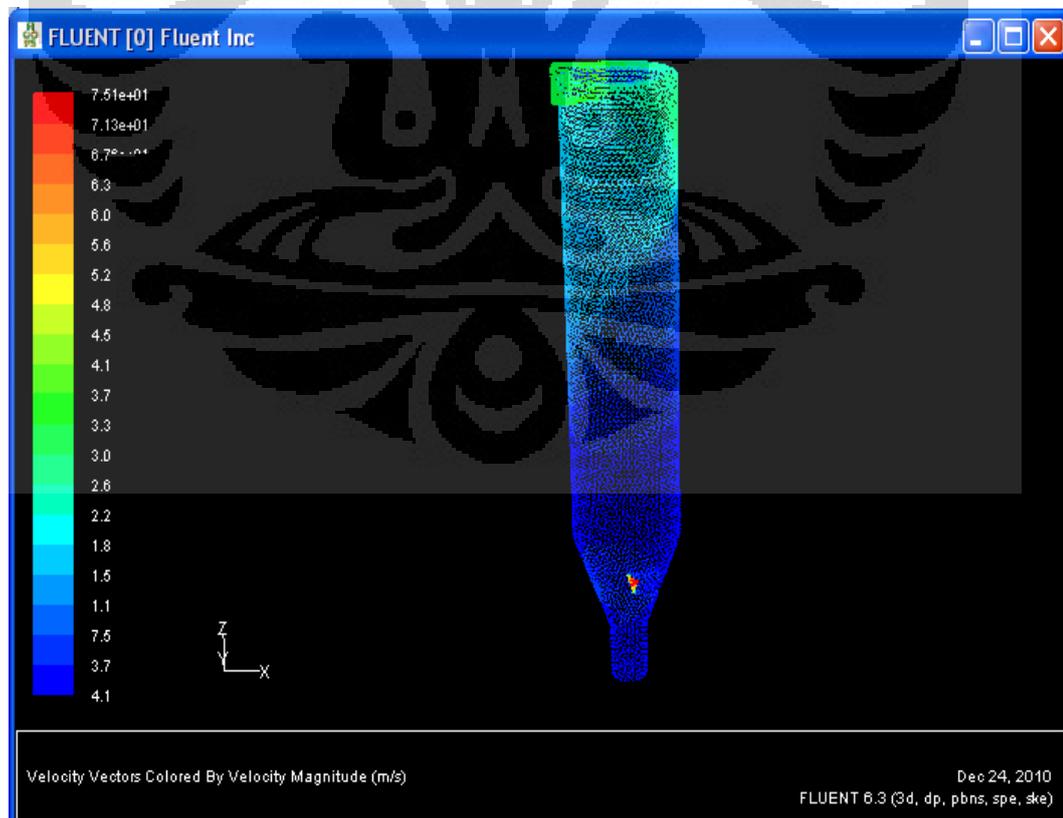


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 283,876 m³/jam, Temperatur 70⁰C

Lampiran 9. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 283,876 m³/jam, Temperatur 80⁰C

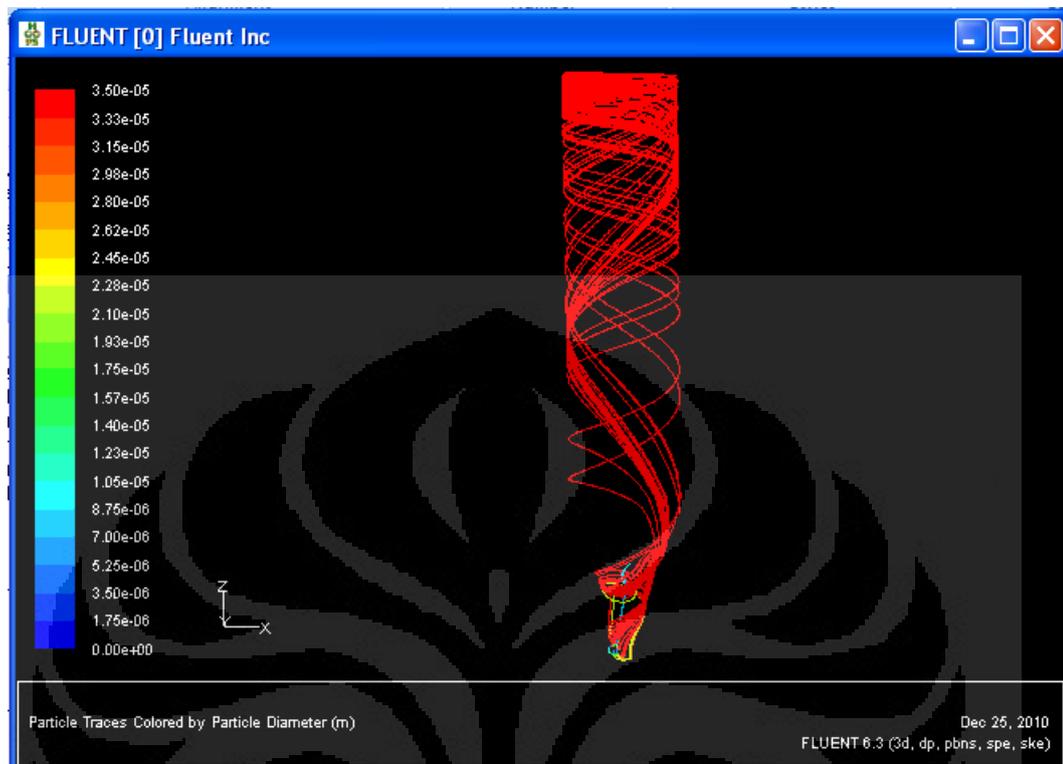


Perubahan diameter partikel pada flow udara 283,876 m³/jam, Temperatur 80⁰C Distribusi

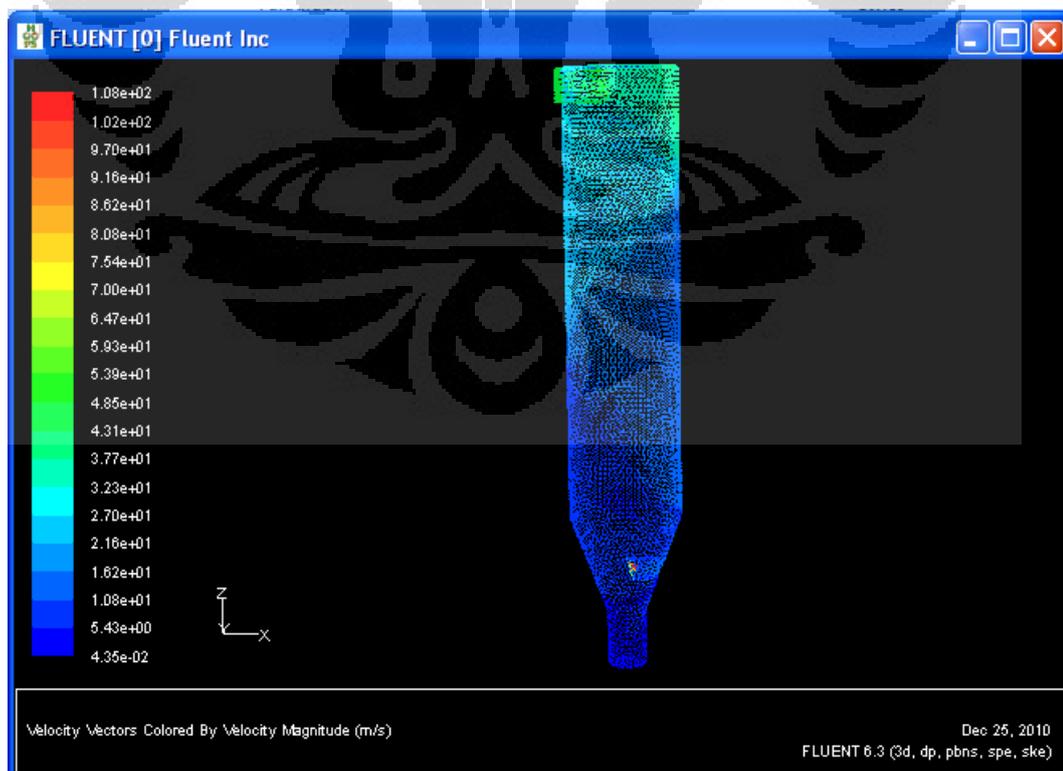


kecepatan udara pada flow udara 283,876 m³/jam, Temperatur 80⁰C

Lampiran 10. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 396,535 m³/jam, Temperatur 50⁰C

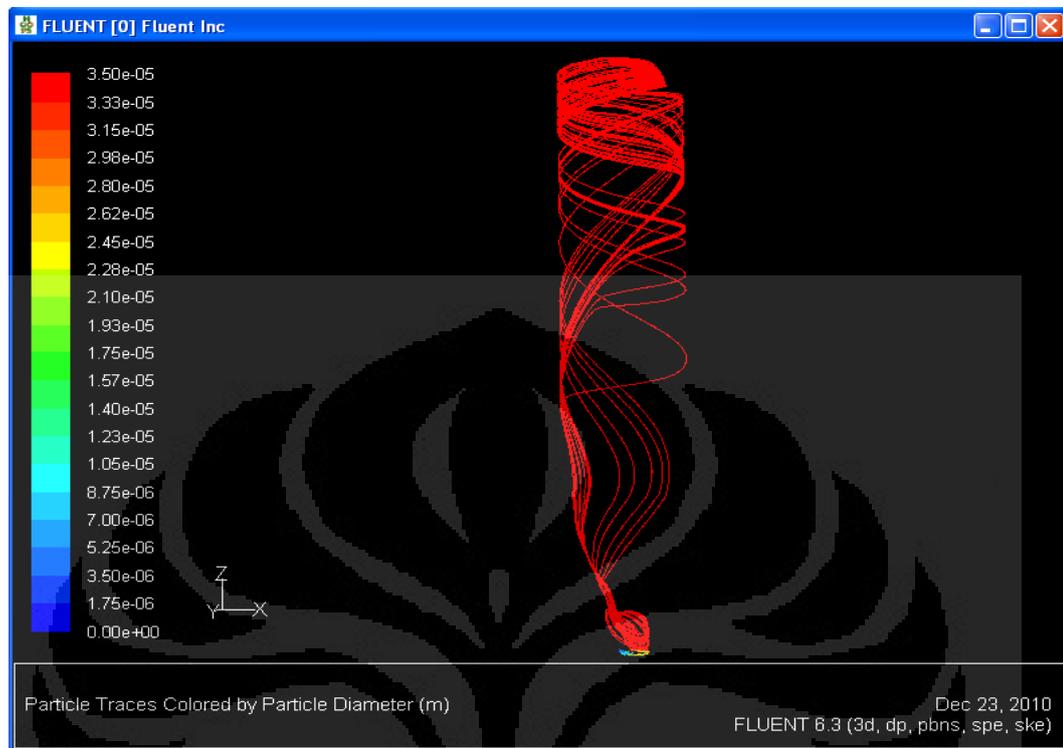


Perubahan diameter partikel pada flow udara 396,535 m³/jam, Temperatur 60⁰C

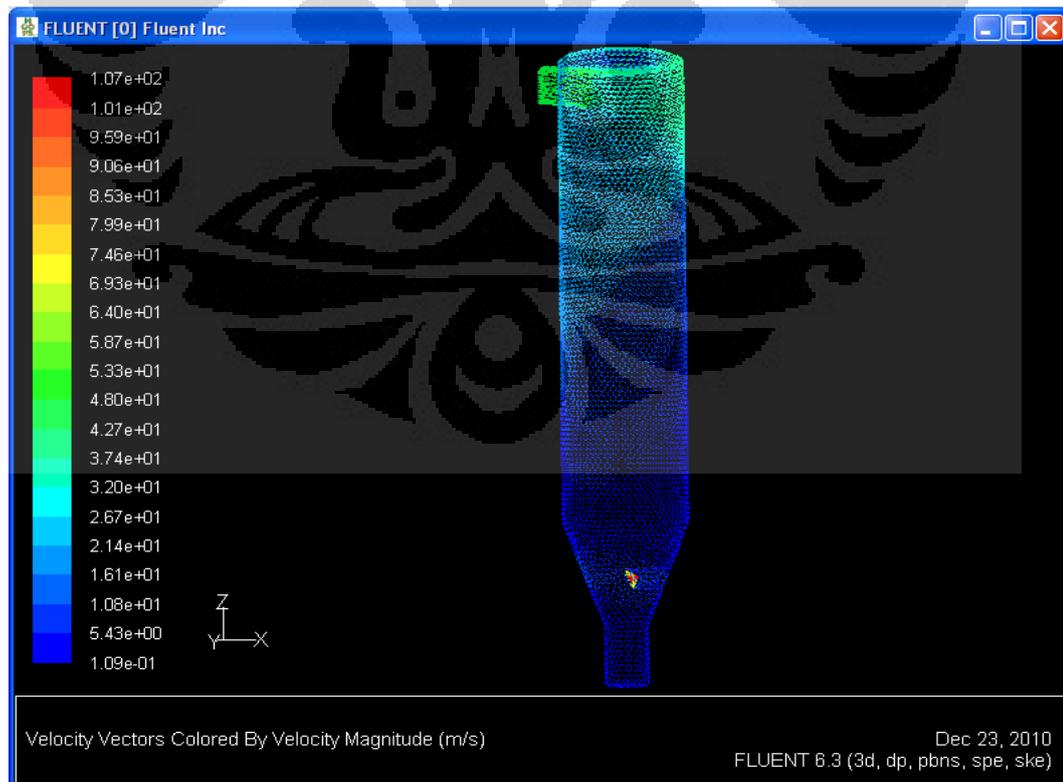


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 396,535 m³/jam, Temperatur 50⁰C

Lampiran 11. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 396,535 m³/jam, Temperatur 60⁰C



Perubahan diameter partikel pada flow udara 396,535 m³/jam, Temperatur 60⁰C

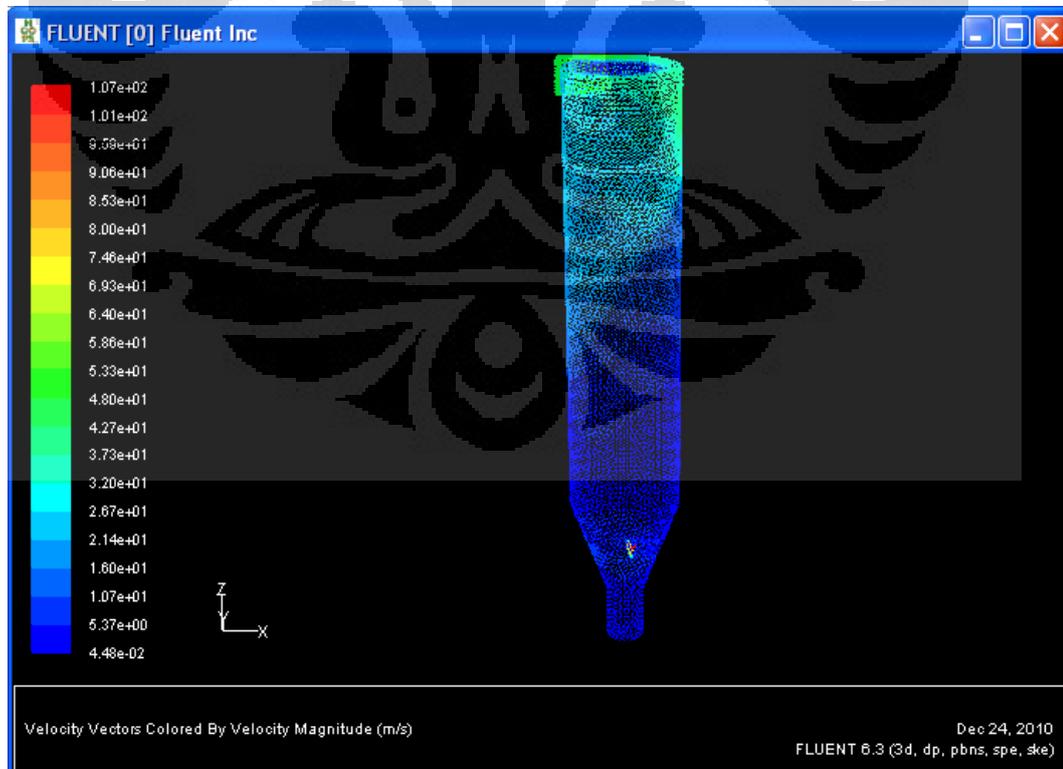


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 396,535 m³/jam, Temperatur 60⁰C

Lampiran 12. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 396,535 m³/jam, Temperatur 70⁰C

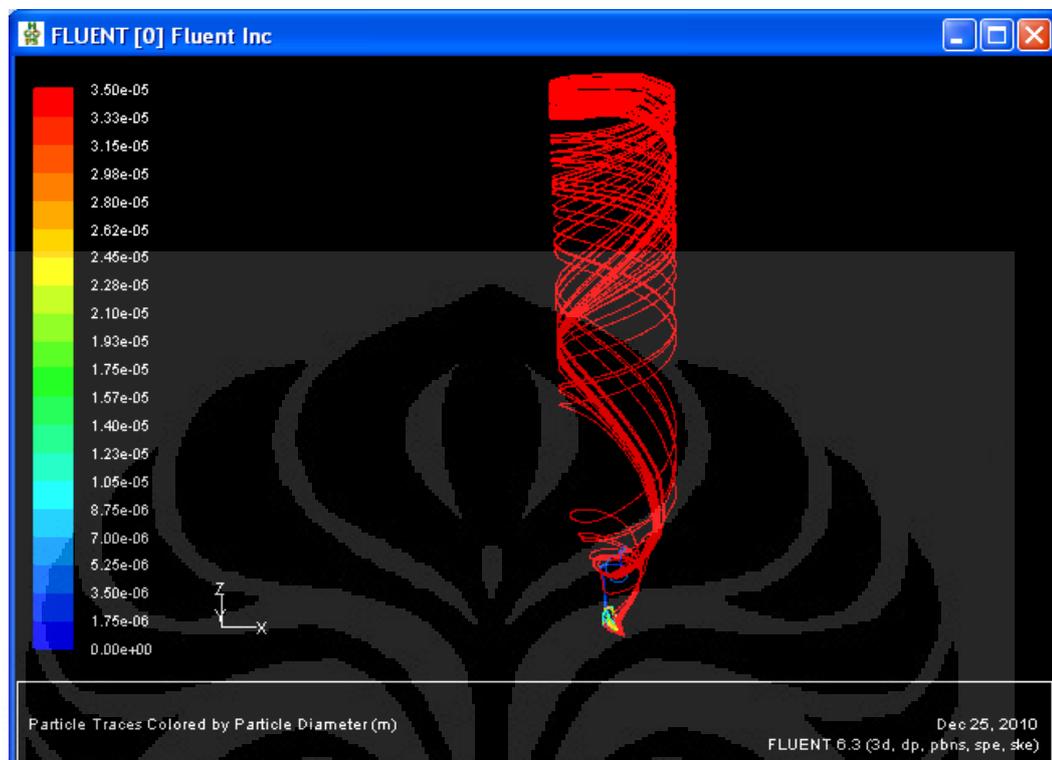


Perubahan diameter partikel pada flow udara 396,535 m³/jam, Temperatur 70⁰C

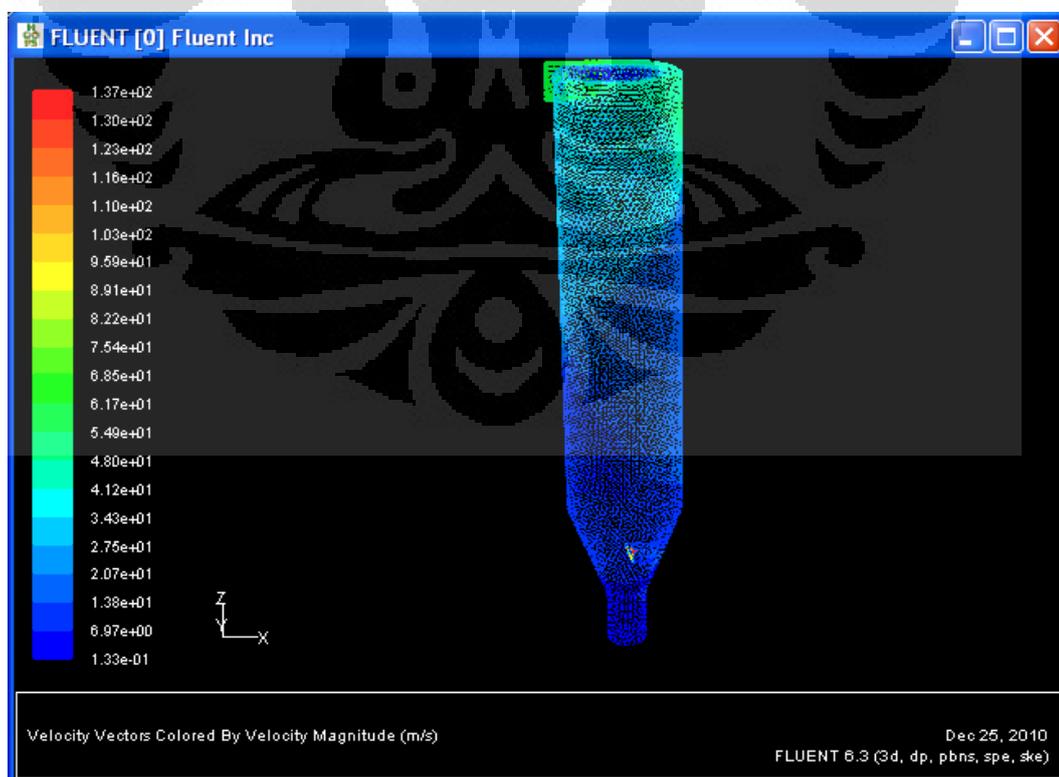


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 396,535 m³/jam, Temperatur 70⁰C

Lampiran 13. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 495,67 m³/jam, Temperatur 50⁰C

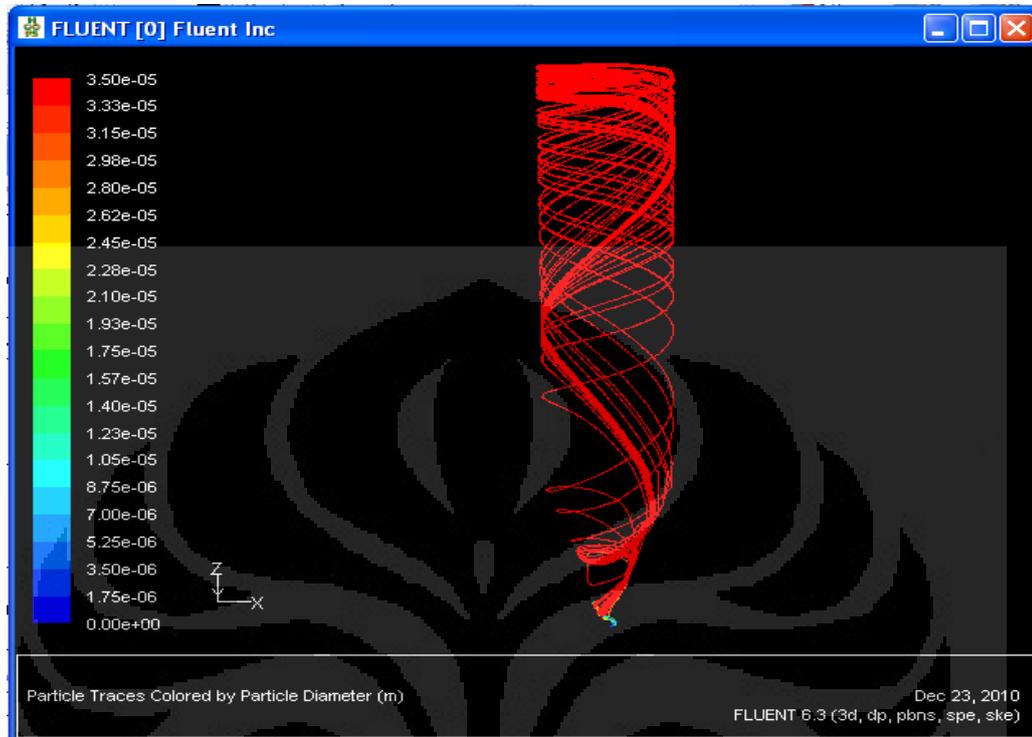


Perubahan diameter partikel pada flow udara 495,67 m³/jam, Temperatur 50⁰C

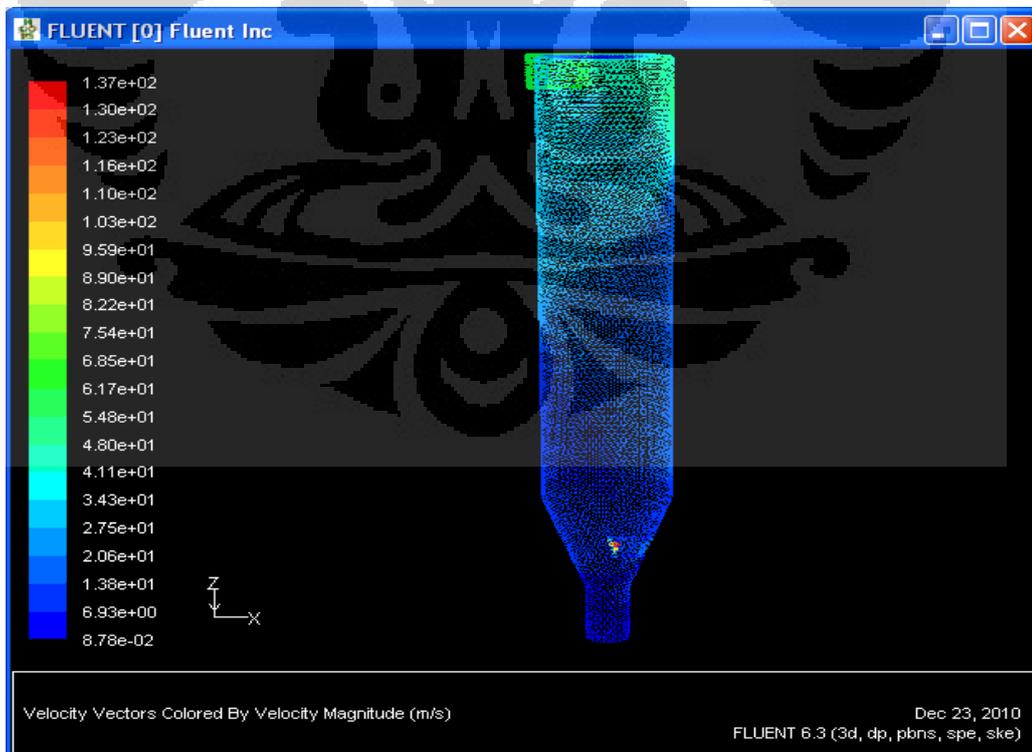


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 495,67 m³/jam, Temperatur 50⁰C

Lampiran 14. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 495,67 m³/jam, Temperatur 60⁰C



Perubahan diameter partikel pada flow udara 495,67 m³/jam, Temperatur 60⁰C

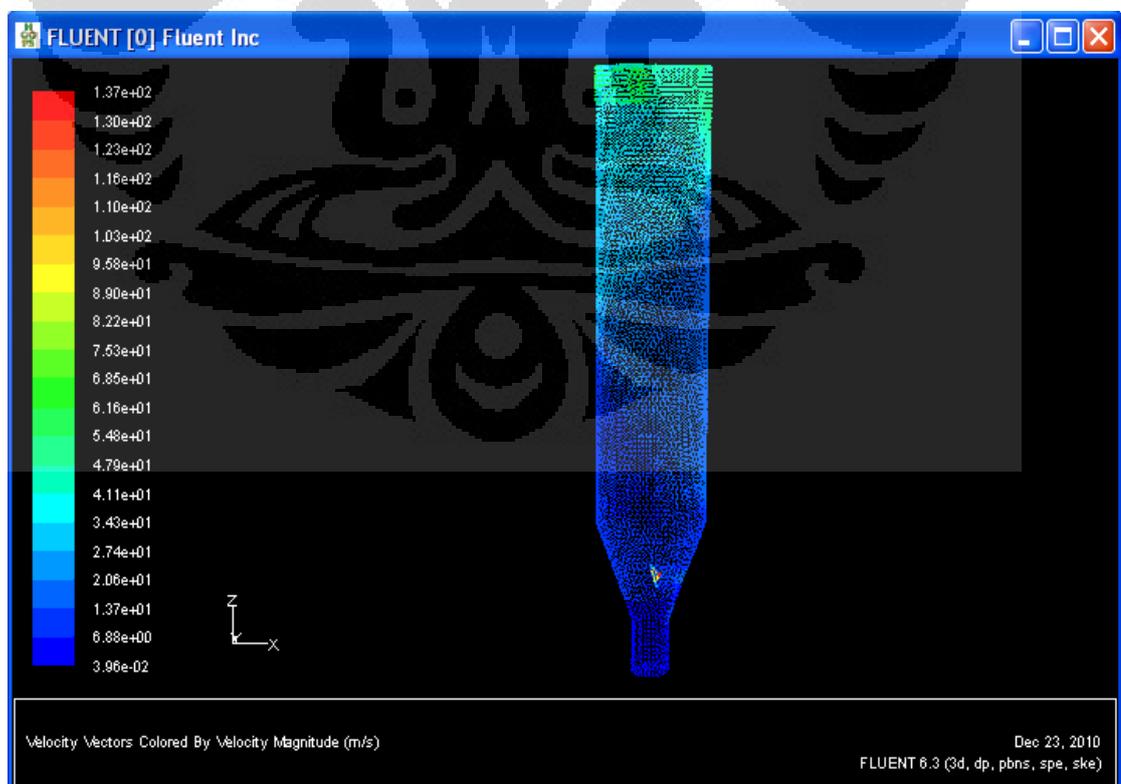


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 495,67 m³/jam, Temperatur 60⁰C

Lampiran 15. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 495,67 m³/jam, Temperatur 70⁰C



Perubahan diameter partikel pada flow udara 495,67 m³/jam, Temperatur 70⁰C

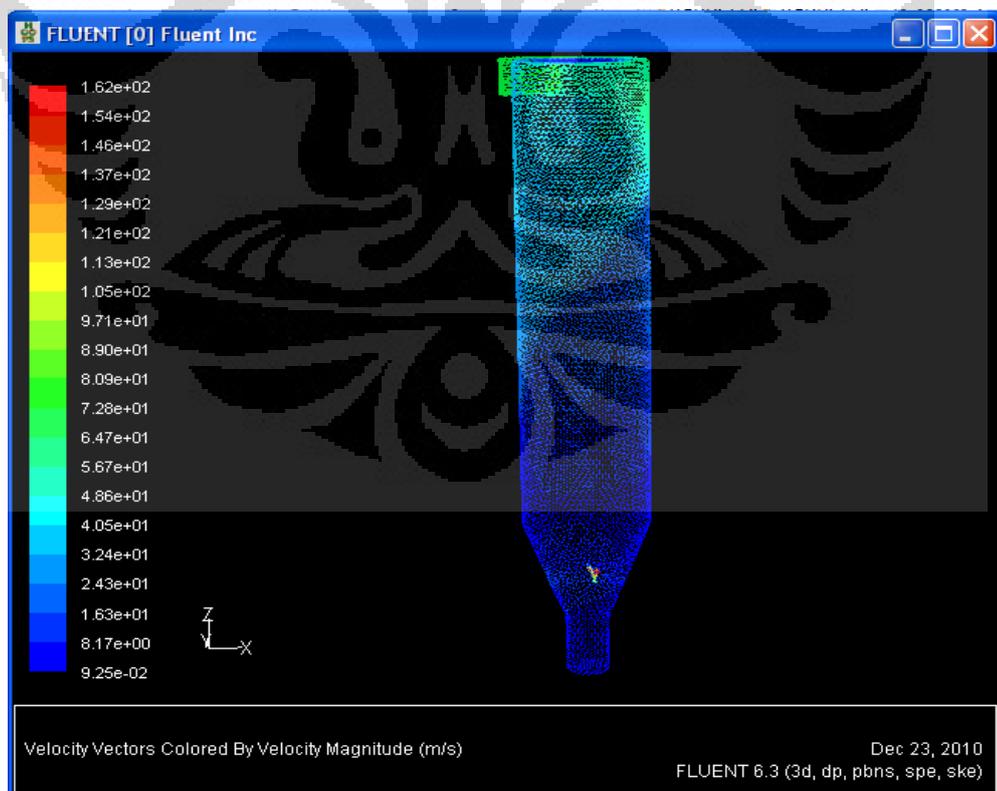


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 495,67 m³/jam, Temperatur 70⁰C

Lampiran 16. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 598,1 m³/jam, Temperatur 40^oC



Perubahan diameter partikel pada flow udara 598,1 m³/jam, Temperatur 40^oC



Distribusi kecepatan udara pada flow udara 598,1 m³/jam, Temperatur 40^oC