



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD PENDING SEMPROT  
DARI AIR DAN SARI BELIMBING**

**SKRIPSI**

**HERY PRABOWO  
0806368585**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD PENDING SEMPROT  
DARI AIR DAN SARI BELIMBING**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

**HERY PRABOWO  
0806368585**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Hery Prabowo**  
**NPM : 0806368585**  
**Tanda Tangan :**  
**Tanggal :**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Hery Prabowo

NPM : 0806368585

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Eksperimen Dan Simulasi CFD Pengering Semprot Dari  
Air Dan Sari Belimbing

**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, MME ( )

Ditetapkan di :

Tanggal :

## KATA PENGANTAR

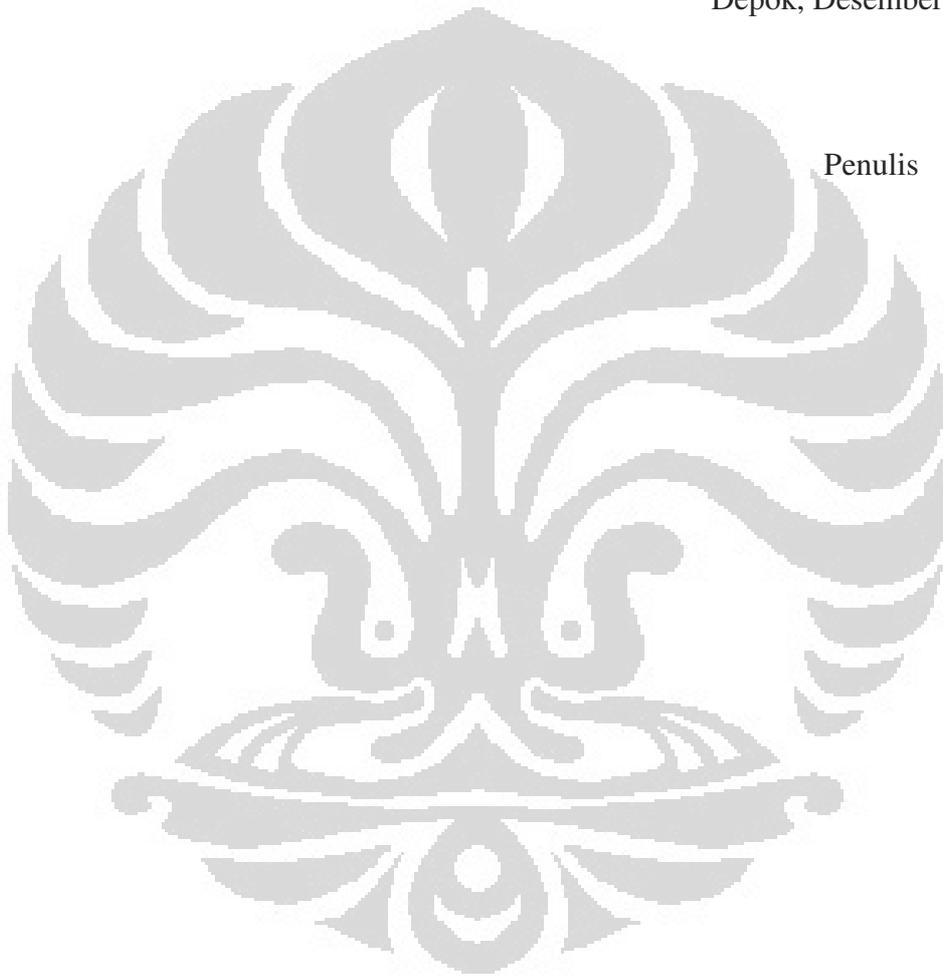
Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmatnya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari 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 semprot;
4. Ayah penulis Darwono dan Ibu penulis Ru'inah terima kasih kalian telah mendukung anakmu ini. Skripsi ini kupersembahkan untuk kalian.
5. Mas Anton, Mba Lia dan Adiku Putri Ratna Sari yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
6. Andi Camalata dan Arief Muslim saudara seperjuangan dalam mengerjakan penelitian ini.
7. Keluarga Ladifa yang telah memberikan dukungan moral dan do'a.
8. Saudara-saudaraku penghuni Kos Ladifa 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, 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 : Hery Prabowo  
NPM : 0806368585  
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 SARI BELIMBING**, 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 : Desember 2010

Yang menyatakan,

(Hery Prabowo)

## ABSTRAK

Nama : Hery Prabowo  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Eksperimen Dan Simulasi CFD Pengering Semprot Dari Air Dan Sari Belimbing.

Indonesia memiliki hasil alam yang sangat banyak, yang pada pengolahannya sering membutuhkan proses pengeringan dan diantaranya 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 didalam pengering semprot adalah 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  $\pm 5$  kg larutan tiap jam). Eksperimen dilakukan dengan parameter yang akan divariasikan pada alat ini meliputi laju aliran bahan (larutan), laju aliran udara pengering, 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 maka laju penguapan semakin kecil. Untuk pengujian, bahan yang diuji adalah air dan sari buah belimbing.

Kata kunci:

Pengering Semprot, Laju Penguapan, Simulasi CFD, Pemanas Listrik

## ABSTRACT

Name : Hery Prabowo  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Experiment And CFD Simulation of Spray Dryer for  
water and Starfruits Extract.

Indonesia has a natural outcome very much, which in its processing often requires the process of drying and spray drying them (spray dryer). The advantages of this type of dryer is mainly for heat-sensitive material. The rate of heat transfer and mass transfer for a droplet moving in a spray dryer is high. So because the evaporation rate is very high then the droplet was maintained at low temperatures. However, this type of dryer generally has a large capacity so that for small capacities are still many obstacles. While the capacity of this small much-needed good 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 tool include material flow rate (solution), drying air flow rate and drying air temperature.

Results from experiments and CFD simulations on small capacity spray dryers is obtained between experimental data obtained by simulating the evaporation rate is almost the same. Where the higher the air temperature the smaller the evaporation rate. For testing, the material tested is water and starfruits juice.

Keywords:

Spray Drying, Evaporation Rate, CFD Simulation, 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.....	xiv
DAFTAR GRAFIK.....	xxv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
DAFTAR NOTASI.....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Perumusan Masalah.....	2
I.3 Tujuan Penelitian.....	2
I.4 Batasan Masalah.....	2
I.5 Metodologi Penelitian.....	3
I.6 Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
II.1 Pengertian Pengerinan.....	5
II.2 Prinsip Dasar Pengerinan.....	5
II.3 Laju pengeringan.....	7
II.4 Karakteristik Hidratasi (penguapan air).....	8
II.4.1 Kadar Air.....	9
II.4.2 Aktivitas Air.....	11
II.4.3 Diagram Psikrometrik.....	12
II.4.4 Kurva Sorpsi Isotermik.....	16
II.5 Proses Peneringan.....	18

II.6	Pengering Semprot.....	20
II.7	Computational Fluid Dynamics (CFD).....	21
II.7.1	Meshing.....	21
II.7.2	Pre-Processor.....	22
II.7.3	Solver.....	23
II.7.4	Post-Processor.....	23
<b>BAB III</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>24</b>
III.1	Metode Penelitian.....	24
III.1.1	Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian.....	24
III.1.2	Alur Kerangka Penelitian.....	25
III.1.3	Peralatan dan Alat Ukur.....	26
III.2	Perhitungan <i>flow</i> Udara.....	31
III.2.1	Perancangan <i>Orifice</i> .....	31
III.2.2	Perhitungan Laju Aliran Udara masuk.....	32
III.3	Perhitungan Kinerja Sistem.....	35
III.3.1	Bahan Uji Air.....	35
III.3.2	Bahan Uji Air Belimbing .....	36
III.4	Perhitungan Energi.....	36
III.5	Eksperimen Pengering Semprot.....	39
III.5.1	Set Up Alat Pengering Semprot.....	39
III.5.2	Prosedur Eksperimen Pengering Semprot .....	39
III.6	Data Eksperimen.....	41
III.6.1	Data Eksperimen Dengan Bahan air.....	41
III.6.2	Data Eksperimen Dengan Bahan Sari Belimbing....	42
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISA HASIL DATA EKSPERIMEN DAN SIMULASI</b>	
	<b>CFD.....</b>	<b>43</b>
IV.1	Analisa Hasil Eksperimen dan Simulasi CFD Pengering	
	Semprot.....	43
IV.1.1	Bahan Uji Air (H <sub>2</sub> O).....	43

IV.1.2 Bahan Uji Sari Belimbing.....	45
IV.2 Kinerja Sistem.....	46
IV.3 Analisa Perbandingan Antara Kinerja Sistem Pada Air dan Sari Belimbing.....	47
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>48</b>
V.1 Kesimpulan.....	48
V.2 Saran.....	48
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>49</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>50</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Air bergerak melalui celah kapiler bahan .....	6
Gambar 2.2.	Bahan menyerap suhu di sekitarnya .....	7
Gambar 2.3.	Aktifitas air vs moisture content berbagai macam jenis makanan...11	
Gambar 2.4.	Diagram Psikrometrik .....	12
Gambar 2.5.	Garis Jenuh.....	13
Gambar 2.6.	Higrometer jenis ventilasi .....	14
Gambar 2.7.	Sling Psikrometer .....	15
Gambar 2.8.	Kurva isotermik.....	16
Gambar 2.9.	Aktifitas air vs Kelembaban relatif .....	17
Gambar 2.10.	Grafik Periode dari Pengeringan .....	18
Gambar 2.11.	Skema Pengering Semprot .....	20
Gambar 2.12.	Penggambaran sederhana bagaimana mesh bekerja berdasarkan bentuk domain.....	22
Gambar 3.1.	Diagram Alir.....	25
Gambar 3.2.	Skema Pengering Semprot .....	26
Gambar 3.3.	Pressure regulator.....	26
Gambar 3.4.	Pompa fluida dan adaptor DC.....	27
Gambar 3.5.	Nozzle.....	27
Gambar 3.6.	Bejana Pengukur Fluida.....	28
Gambar 3.7.	Blower .....	28
Gambar 3.8.	Orifice.....	29
Gambar 3.9.	Kotak panel.....	29
Gambar 3.10.	Manometer.....	30
Gambar 3.11.	Termometer alkohol.....	30
Gambar 3.12	Lokasi pengambilan tekanan untuk <i>orifice</i> dengan titik pengambilam tekanan pada vena kontrakta.....	31
Gambar 3.13.	Lokasi yang disarankan untuk pengambilan tekanan pada <i>orifice</i> plat kosentrik tipis pinggir siku.....	32
Gambar 3.14.	Koefisien buang untuk <i>orifice</i> kosentrik dalam pipa.....	34

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data eksperimen dengan bahan uji air.....	41
Tabel 3.2 Data eksperimen dengan bahan uji sari beliombing.....	42
Tabel 4.1 Nilai parameter awal dan kondisi eksperimen.....	43
Tabel 4.2 Kinerja Vs Flow udara dengan temperatur 60°C.....	43
Tabel 4.3 Perbandingan Kinerja Sistem.....	47



## DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Laju Pengerinan vs Flow Udara Bahan Air Temperatur $60^{\circ}\text{C}$ .....	44
Grafik 4.2 Laju Pengerinan vs Flow Udara Bahan Sari Belimbing.....	45
Grafik 4.3 Kinerja Sistem.....	46
Grafik 4.4 Perbandingan Kinerja Sistem Pada Air dan Sari Belimbing.....	47



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Diagram psikrometrik udara Pada suhu 100 °C.....	50
Lampiran 2. Diagram psikrometrik udara Pada suhu 90 °C.....	50
Lampiran 3. Diagram psikrometrik udara Pada suhu 80 °C.....	51
Lampiran 4. Diagram psikrometrik udara Pada suhu 70 °C.....	51
Lampiran 5. Diagram psikrometrik udara Pada suhu 60 °C.....	52
Lampiran 6. Perubahan diameter partikel pada flow udara 193,247306 m <sup>3</sup> /jam Temperatur 50 °C.....	52
Lampiran 7. Distribusi kecepatan udara pada flow udara 193,247306 m <sup>3</sup> /jam Temperatur 50 °C.....	53
Lampiran 8. Perubahan diameter partikel pada laju Udara 1.9 X10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /jam, Temperatur 60°C .....	53
Lampiran 9. Distribusi kecepatan udara pada laju Udara 1.9 X10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /jam, Temperatur 60°C].....	54
Lampiran 10. Perubahan diameter partikel pada laju Udara 1.9 X10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /jam, Temperatur 70°C.....	54
Lampiran 11. Distribusi kecepatan udara pada laju Udara 1.9 X10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup> /jam, Temperatur 70°C.....	55

## DAFTAR NOTASI

Kadar solid bahan	= $TS_1$	%
Massa jenis bahan	= $\rho_b$	( $\text{kg m}^3$ )
Suhu masukan bahan	= $T_b$	( $^{\circ}\text{C}$ )
Kadar air produk kering	= $TW_2$	% w.w.b.
Massa jenis produk	= $\rho_p$	( $\text{kg m}^3$ )
Suhu produk	= $T_p$	( $^{\circ}\text{C}$ )
Critical Moisture Content	= $CMC$	% w.w.b.
Diameter nozzle	= $D_{nozzle}$	(mm)
Laju aliran bahan	= $\dot{m}_b$	( $\text{l jam}^{-1}$ )
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	= $\lambda$	( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
Kalor jenis produk	= $C_{pp}$	( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
Kalor jenis bahan	= $C_{pb}$	( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
Kalor jenis uap air	= $C_{puap}$	( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
Kalor jenis udara kering	= $C_{pudara}$	( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
Konduktivitas termal udara	= $k$	( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
Viskositas udara	= $\mu$	( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )

# BAB I PENDAHULUAN

## I.1 Latar Belakang

Untuk meningkatkan nilai tambah komoditi pertanian dan kemampuan daya simpan produk-produk terhadap kerusakan, diperlukan inovasi teknologi pengolahan untuk menghasilkan ragam produk turunan yang tentunya membutuhkan perlakuan yang berbeda satu sama lain, teknologi proses atau pengolahan tersebut harus didasarkan pada karakteristik bahan yang diolah dan produk akhir yang diinginkan. Pengeringan menjadi salah satu proses produksi yang penting pada beberapa industri yang memerlukan pengeringan terhadap bahan tertentu atau produk untuk mendapatkan produk yang diinginkan karena proses pengeringan menjadi suatu faktor yang menentukan baik tidaknya proses dan produk yang dihasilkannya.

Dalam proses pengeringan, udara panas merupakan faktor penting untuk menentukan kinerja sistem dari pengering semprot. Dalam upaya peningkatan kinerja sistem dari pengering semprot banyak cara dilakukan antara lain dengan menggunakan *air heater*. Penggunaan *air heater* ditentukan oleh keadaan lingkungan sekitar.

Suhu akhir partikel (keluar dari siklon) dapat dianggap sama dengan suhu udara keluar ruang pengering karena partikel bergerak dengan kecepatan yang relatif sama dengan udara. Setelah partikel mengalami proses pengeringan konstan (*constant rate periode*), maka partikel akan mengalami proses pengeringan difusi (*falling rate periode*). Pada proses ini air dalam partikel menguap melalui celah-celah partikel (difusi). Semakin lama penguapan semakin kecil tapi proses perpindahan panas masih tetap terjadi. Panas yang diterima oleh partikel pada proses pengeringan difusi selain untuk penguapan juga untuk menaikkan suhu partikel. Untuk heat sensitive material harus diperiksa apakah suhu akhir partikel melebihi batas suhu rusak material tersebut. Jika suhu akhir

partikel melebihi suhu rusak bahan maka produk tidak dapat digunakan karena mengalami *overheat* (hangus).

## **I.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka penelitian ini dirumuskan dengan melakukan simulasi CFD dan eksperimen untuk mengetahui karakteristik pengering dan perbandingan kinerja sistem dengan menggunakan bahan air dan sari belimbing. Penelitian dilakukan dengan membandingkan parameter-parameter seperti tekanan kompresor dan laju aliran bahan setiap parameter tersebut divariasikan temperatur dan laju aliran udara.

## **I.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kondisi optimal sistem sistem pengering semprot pada Laboratorium Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
2. Mengetahui kinerja eksperimen dengan kinerja simulasi pengering semprot.
3. Mengetahui perbandingan laju pengeringan hasil eksperimen dan simulasi CFD.

## **I.4 Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini, dibatasi pada:

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

## I.5 Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini, metode untuk mengumpulkan sumber data dan informasi 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. Pengambilan data eksperimen.

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah data suhu udara kering dan basah yang keluar dari ruang pengering utama.

### 3. Simulasi CFD.

Data kecepatan dan suhu udara panas dari perhitungan tersebut diambil kemudian menjadi masukan pada simulasi Fluent 6.3. Kemudian diperoleh data berupa kadar uap air keluar dari ruang pengering utama.

## I.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

### Bab I: Pendahuluan

Menjelaskan mengenai latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

### Bab II: Tinjauan Pustaka

Menjelaskan tentang konsep pengeringan, karakteristik pengering semprot, dan simulasi CFD

### Bab III: Metodologi Penelitian

Menjelaskan tentang tahapan-tahapan yang harus dilakukan selama kegiatan penelitian, peralatan dan alat ukur yang diperlukan selama penelitian, dan proses pengambilan data.

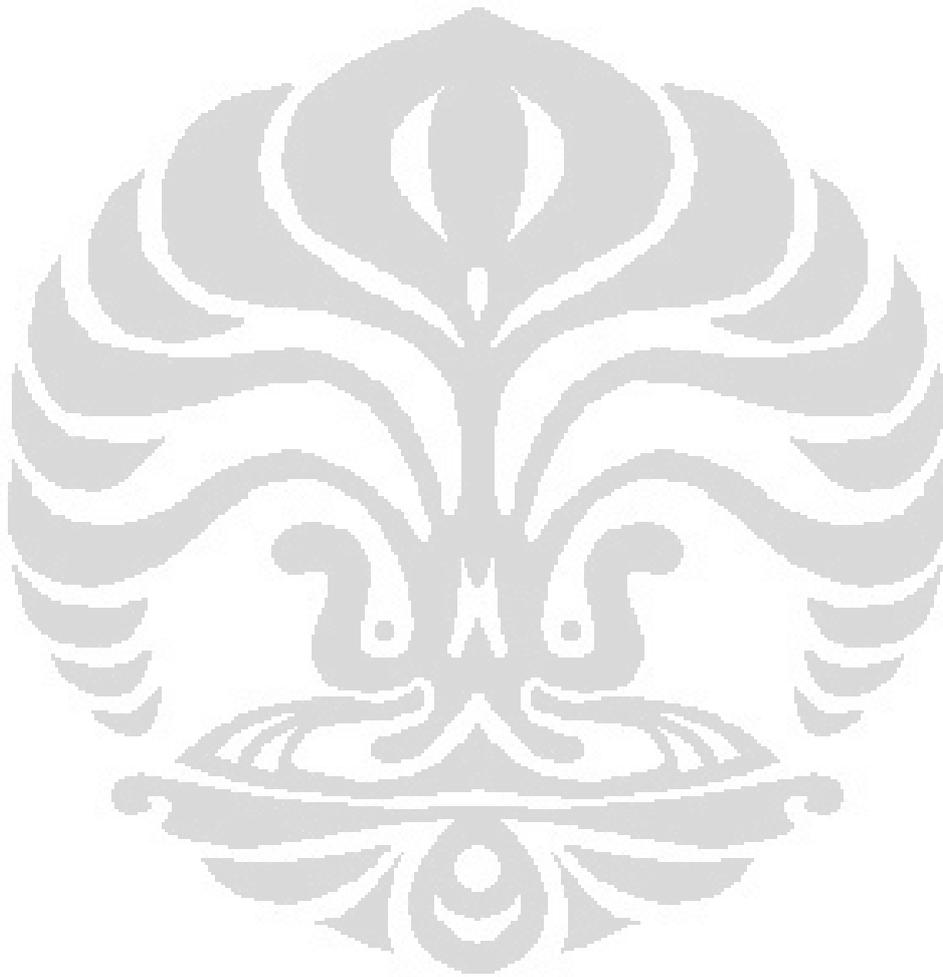
### Bab IV: Analisa Hasil Eksperimen

Mendapatkan nilai laju pengeringan dari perhitungan eksperimen dan simulasi. Memuat hasil-hasil dari simulasi CFD, dan analisa

membahas hasil dari data simulasi dan eksperimen dibandingkan dengan perhitungan menurut teori.

Bab V: Penutup

Menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk kemajuan penelitian berikutnya.



## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **II.1 Pengertian Pengeringan**

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 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 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.

### **II.2 Prinsip Dasar Pengeringan**

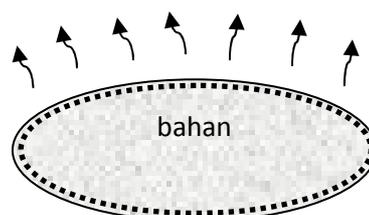
Proses pengeringan pada prinsipnya menyangkut proses perpindahan panas dan massa yang terjadi secara bersamaan (simultan). Pertama-tama panas harus ditransfer dari medium pemanas ke bahan. Selanjutnya setelah terjadi

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

### II.3 Laju pengeringan

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam kecepatan pengeringan ialah:

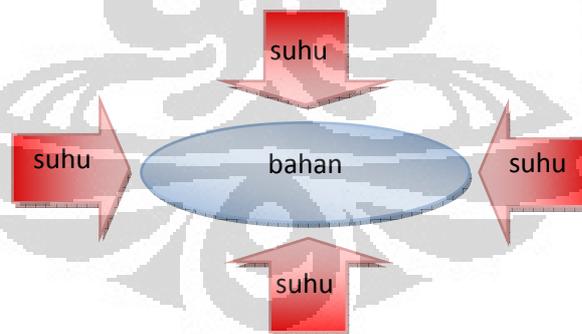
#### 1. Luas Permukaan

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 dahulu. 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.

#### 2. 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

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.

### 3. Kecepatan Aliran Udara

Udara yang bergerak dan mempunyai kecepatan aliran 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.

### 4. 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).

## II.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).

### II.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 (sumber : Arun S. Mujumdar dan Sakamon Devahastin. Chapter 1: Fundamental principle of drying).

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

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 :

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

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.

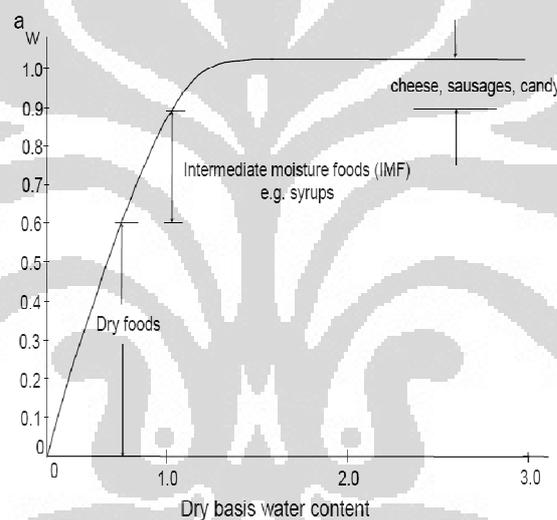
Kandungan air pada suatu bahan hasil pertanian terdiri dari 3 jenis yaitu :

- 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 negatif 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 teikat secara kimia yang paling besar.

## II.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 hidratisasi 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 2.3. Aktifitas air vs *moisture* content berbagai macam jenis makanan

Oleh karena itu untuk mencegah pertumbuhan mikrobia, aktifitas air pada bahan harus diatur. Istilah aktifitas 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, aktifitas air berbanding lurus dengan jumlah mol pelarut dan berbanding terbalik dengan jumlah mol di dalam larutan.

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

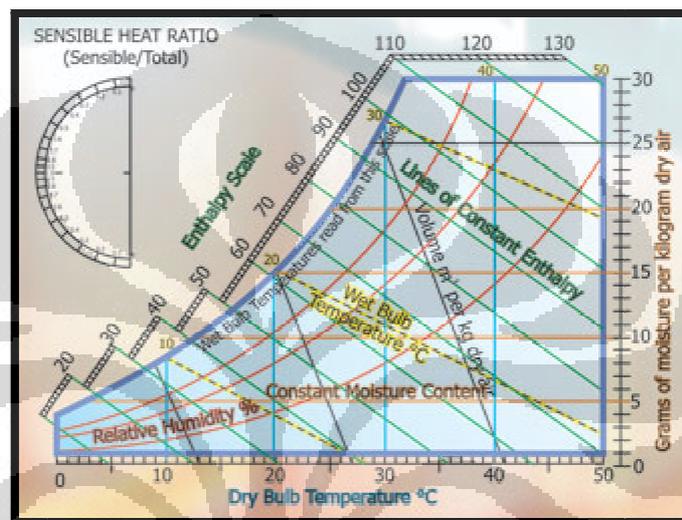
di mana :

$n_1$  = jumlah mol pelarut

$n_2$  = jumlah mol zat terlarut

$n_1 + n_2$  = jumlah mol larutan

### II.4.3 Diagram Psikrometrik



Gambar 2.4 Diagram Psikrometrik

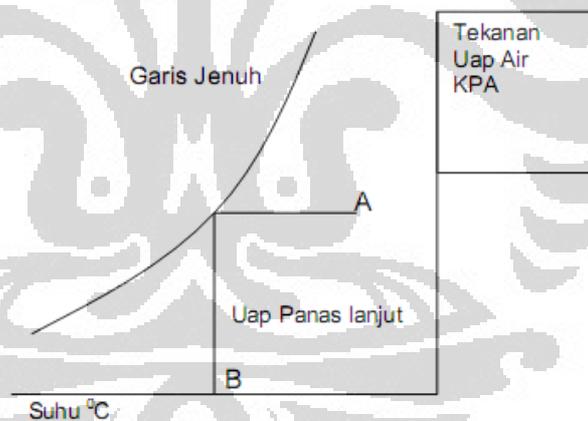
Gambar 2.4 adalah diagram psikometri dimana psikometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air yang mempunyai arti yang sangat penting dalam pengkondisian udara atau penyegaran udara karena atmosfer merupakan campuran antara udara dan uap air. Prinsip-prinsip psikrometrik akan 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*)

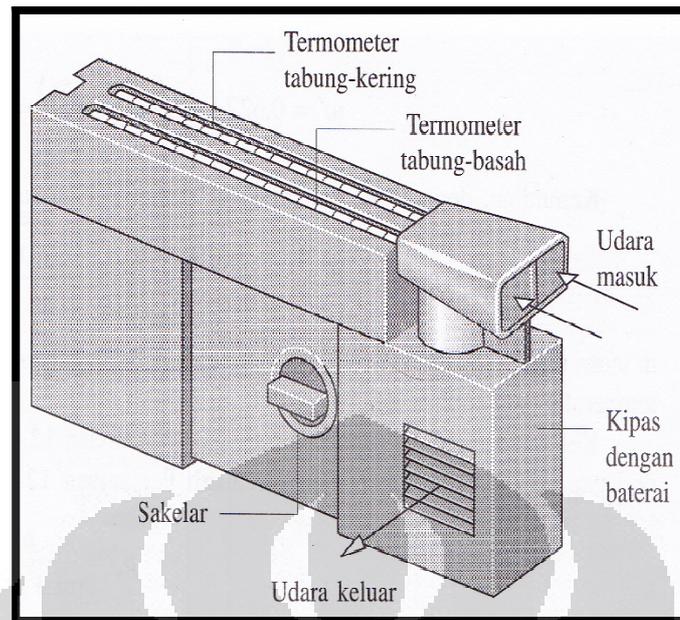
Garis jenuh ini adalah salah satu istilah pada diagram psikrometri koordinat-koordinat dimana suhu ( $t$ ) sebagai basis dan tekanan uap air ( $p_s$ ) sebagai ordinat. Untuk jelasnya dapat dilihat pada diagram psikrometri. Garis jenuh dapat ditarik pada diagram tersebut seperti gambar di bawah. Data 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 2.5. Garis Jenuh

- 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 2.6. Higrometer jenis ventilasi

- Temperatur Bola Basah (*Wet Bulb*)

Temperatur ini disebut juga temperatur jenuh adiabatik diperoleh dengan menggunakan termometer dengan sensor yang dibalut dengan kain 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.

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

di mana :

RH = Kelembaban Relatif (%)

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

P<sub>s</sub> = Tekanan uap air jenuh pada suhu T (atm)

T = Suhu atmosfer (<sup>0</sup> C)

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

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

di mana :

RHs = Kelembaban relatif dalam keadaan kesetimbangan (%)

Ps = 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.

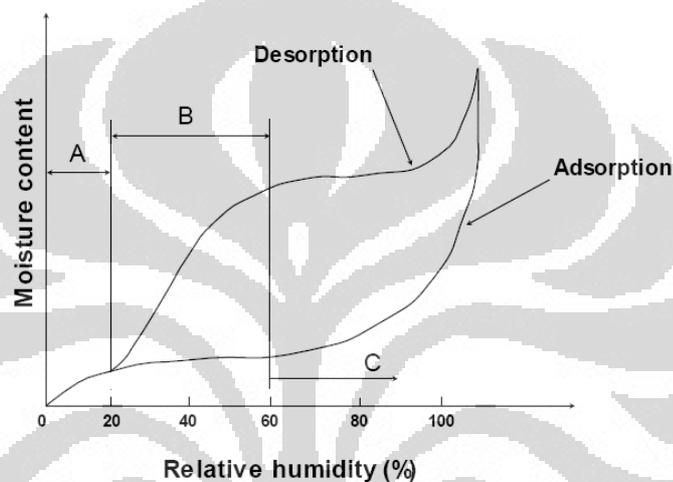


Gambar 2.7. Sling Psikrometer

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.

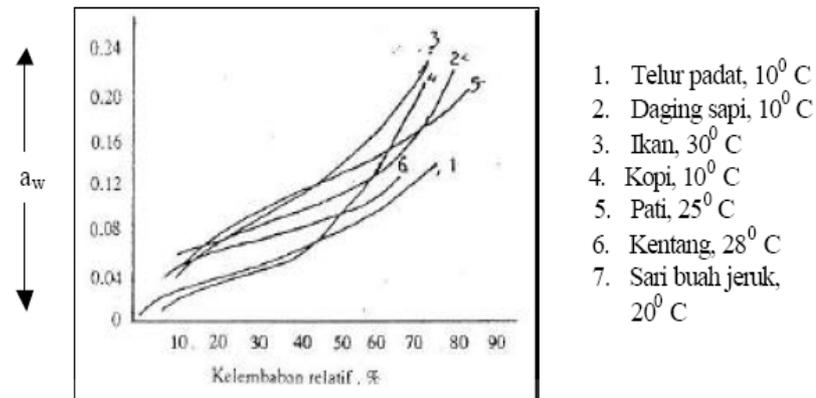
Perbedaan suhu bola kering dan bola basah menunjukkan kelembaban udara itu. Makin besar perbedaan suhu yang ada, maka makin rendah kelembaban nisbi yang ada di udara sekeliling pada saat itu. Suhu bola kering pada diagram psikrometrik ditunjukkan oleh garis tegak lurus, sedangkan suhu bola basah oleh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

#### II.4.4 Kurva Sorpsi Isotermik



Gambar 2.8. Kurva isotermik

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 hidratisasi 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 2.9. Aktifitas air vs Kelembaban relatif

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  $a_w$  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 enzimatis dalam bahan pangan dapat dihindari. Air pada kisaran  $a_w$  0,20 - 0,70 kurang terikat kuat bila dibandingkan dengan air pada kisaran  $a_w$  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

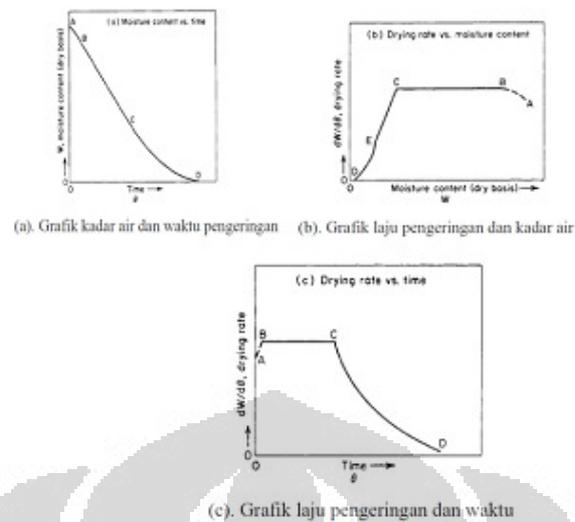
relatif dan suhu tertentu, bahan higroskopis hanya dapat dikeringkan sampai kadar air keseimbangan saja.

## II.5 Proses Pengerinan

Proses pengerinan dapat dibagi menjadi dua periode yaitu periode dengan laju pengerinan konstan dan periode dengan laju pengerinan menurun (Henderson dan Perry, 1976). Laju pengerinan konstan terjadi sampai air bebas dipermukaan bahan telah hilang dan laju pengeluaran air semakin berkurang.

Laju pengerinan 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 pengerinan berubah dari konstan ke laju pengerinan menurun dan disebut kadar air kritis. Menurut Henderson dan Perry (1976), laju pengerinan konstan terjadi pada awal proses pengerinan 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 pengerinan 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 pengerinan akan semakin cepat.



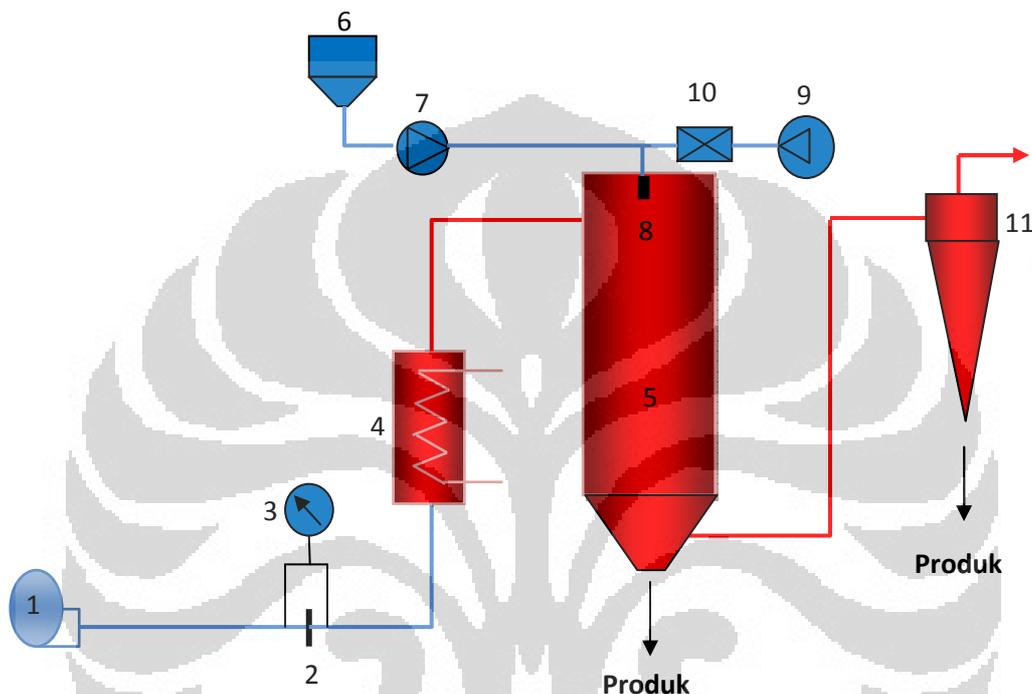
Gambar 2.10 Grafik Periode dari Pengeringan

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.

## II.6 Pengering Semprot

Metode pengeringan semprot merupakan metode pengeringan yang paling banyak digunakan dalam industri terutama industri makanan. Metode ini mampu menghasilkan produk dalam bentuk bubuk atau serbuk dari bahan-bahan seperti susu, buah buahan, bumbu, dan lain-lain.



Gambar 2.11. 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*

### 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 didihnya dapat diturunkan dengan menurunkan tekanan. Tekanan yang diturunkan tidak boleh dibawah titik *tripel point* karena air yang ada pada zat-zat akan membeku.
2. Pengeringan dilakukan secara 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.

## II.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.

### II.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 2.12. Penggambaran sederhana bagaimana mesh bekerja berdasarkan bentuk domain

### II.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.

### II.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.

### II.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 III METODOLOGI PENELITIAN**

### **III.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*) pada 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, hal ini dikarenakan waktu yang sedikit dalam pengambilan data eksperimen. 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.

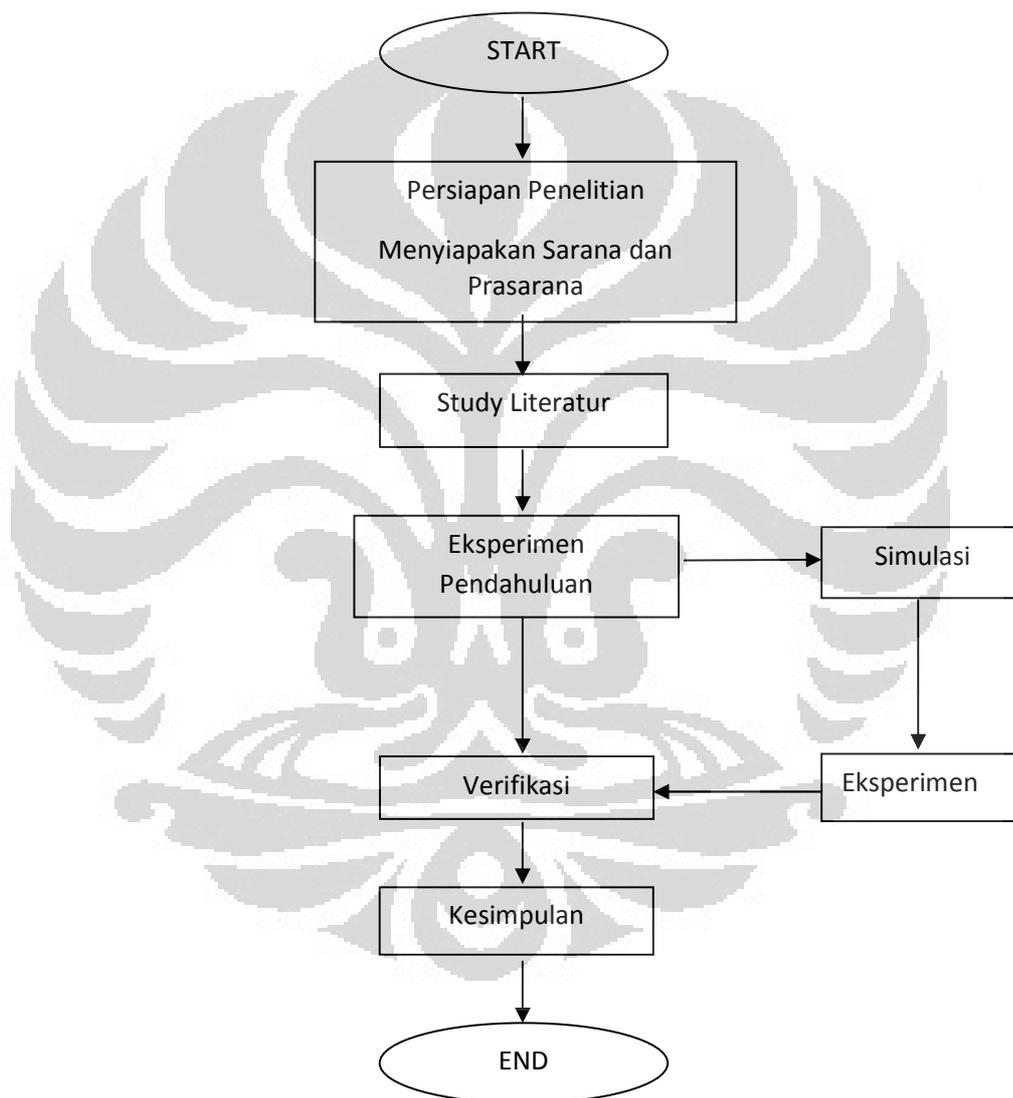
#### **III.1.1 Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian**

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*, laju udara masuk

ruang pengering, dan keadaan penampung produk. Pengambilan data dilakukan pada tanggal 25 November sampai 6 Desember 2010.

### III.1.2 Alur Kerangka Penelitian

Adapun alur kerangka penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir

### III.1.3 Peralatan dan Alat Ukur

Peralatan yang digunakan dalam proses pengambilan data pada pengering semprot 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 mengabsorpsi 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.

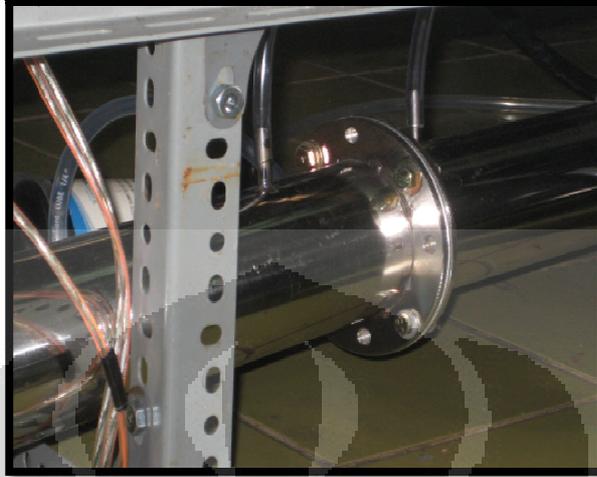
- *Blower*



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.

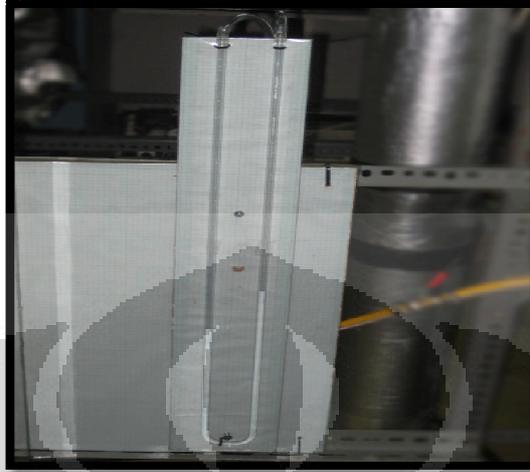
- Kotak Panel



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

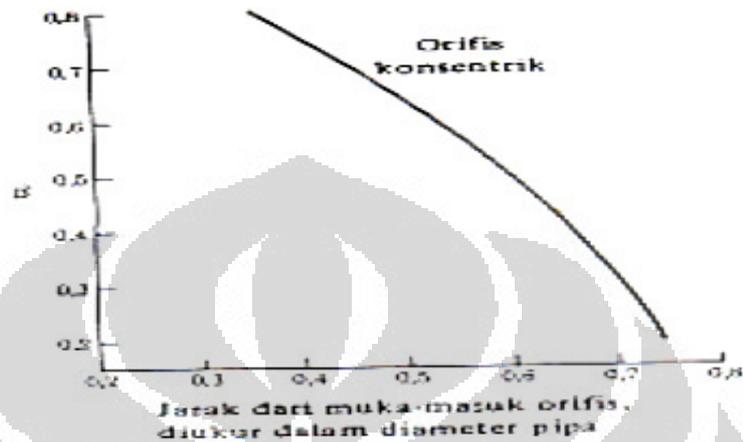


Gambar 3.11 Termometer alkohol

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

## III.2 Perhitungan *Flow* Udara

### III.2.1 Perancangan *Orifice*



Gambar 3.12 Lokasi Pengambilan Tekanan untuk *orifice* dengan titik pengambilan tekanan pada vena kontrakta (J.P. Holman 1985:242).

- Dalam perancangan *orifice* yang pertama kali adalah menentukan rasio diameter ( $\beta$ )

$$\frac{D_2}{D_1} = \beta \quad (3.1)$$

Dimana,  $\beta$  = Rasio diameter (m)

$D_1$  = Diameter pipa (m)

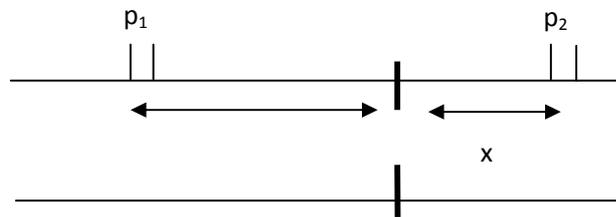
$D_2$  = Diameter *orifice* (m)

$$\beta = 0.3$$

$$\frac{D_2}{D_1} = 0.3$$

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

- Penentuan lubang pada aliran masuk dan keluar *orifice*:



Gambar 3.13 Lokasi yang disarankan untuk pengambilan tekanan pada *orifice* konsentrik, plat tipis, pinggir siku.

- Untuk pengambilan jarak lubang P<sub>1</sub> dengan orifis = 1 x Diameter pipa  
= 7,62 cm
- Untuk pengambilan jarak lubang P<sub>2</sub> dengan orifis adalah dengan melihat grafis pada gambar 3.11 dengan paramet  $\beta = 0,3$ .  
maka untuk nilai  $X = 0.7 \times D_{\text{pipa}}$

### III.2.2. Perhitungan Laju Aliran Udara Masuk

Perhitungan laju aliran bahan menggunakan hubungan antara persamaan bernoulli dengan persamaan kontinuitas, dimana persamaan kontinuitas.

$$\dot{m} = \rho A_1 u_1 = \rho A_2 u_2 \quad (3.2)$$

Dimana  $u$  adalah kecepatan. Jika aliran itu adiabatik dan tanpa gesekan (*frictionless*) dan fluida itu tak mampu mampat (*Incompressible*) maka persamaan Bernoulli dapat tuliskan.

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 = C \quad (3.3)$$

$$\frac{\rho}{g} + h + \frac{1}{2} \cdot g \cdot u^2 \quad (3.4)$$

dimana  $\rho_1 = \rho_2$ . Bila persamaan kontinuitas dan bernoulli diselesaikan secara serentak kita dapatkan sebagai penurunan tekanan.

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho u_2^2}{2g_c} \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

dimana,  $u_1, u_2$  = kecepatan aliran sebelum dan sesudah aliran ( $m/s^2$ )

$P_1, P_2$  = tekanan aliran sebelum dan sesudah lewat orifis (Pa)

$A_1, A_2$  = luas penampang sebelum dan sesudah orifis ( $m^2$ )

$g_c = 1$  ( $kg \cdot m / N \cdot s^2$ )

Maka laju volumetrik ( $Q_{ideal}$ ) adalah

$$Q_{ideal} = A_2 u_2 = \frac{A_2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \sqrt{\frac{2g_c}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (3.6)$$

dimana,  $Q_{ideal}$  = laju aliran volume sebelum orifis ( $m^3/s$ )

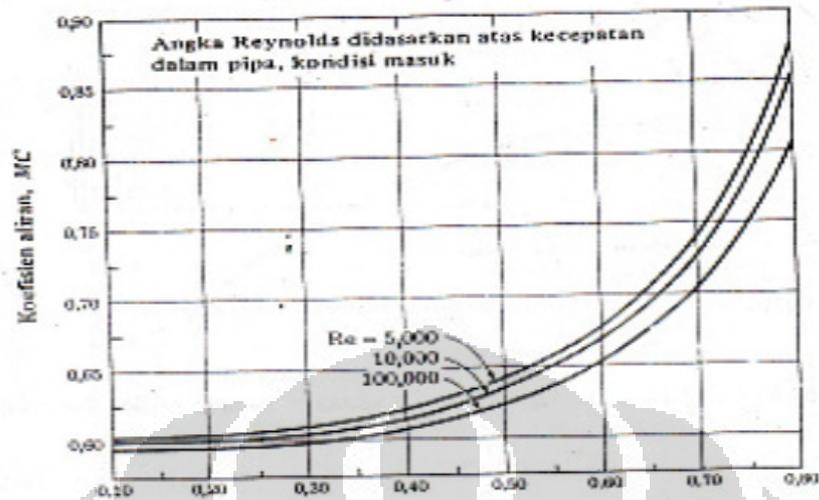
Konstanta empirik pada alat laju aliran ini adalah

$$M = \text{faktor kecepatan masuk} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \quad (3.7)$$

$$K = \text{koefisien aliran} = CM \quad (3.8)$$

$$\beta = \text{rasio diameter} = \frac{d}{D} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (3.9)$$

Konstanta K (koefisien) didapat dari tabel setelah menghitung bilangan Reynolds. Adanya *vena contracta* saat melintasi plat orifis maka persamaan menjadi;  
 $Q_{nyata} = Q_{ideal} C$



Gambar 3.14 Koefisien buang untuk *orifice* konsentrik dalam pipa.

(J.P. Holman 1985:242).

- Nilai Re

$$Re = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D_1}{\mu} \quad (3.10)$$

$$\text{dengan } \mu_m = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{air} \cdot g \cdot h}{\rho_{udara}}}$$

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

$$Re = \frac{1.22 \times 15.53 \times 0.0762}{1.46 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 98.885,67$$

- Nilai K di dapat dari grafik j.p holman hal: 242

$$K = 0,59$$

- $K = MC$

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

$$= 1,06$$

- $\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$

$$= 1000 \times 9,81 \times 15 \cdot 10^{-3}$$

$$= 147,15 \text{ N/m}^2$$

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

$$\mu_2 = 19,641 \text{ m/s}$$

- $Q = A \cdot \mu_2$   
 $= 9 \, 3,334 \text{ m}^3/\text{jam}$

### III.3 Perhitungan Kinerja Sistem

#### III.3.1 Bahan uji air

##### a. Tahapan Perhitungan Kinerja Eksperimen

Parameter perhitungan yang diambil:

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

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

$$Q_{\text{nyata}} = 177,33 \text{ m}^3/\text{jam}$$

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

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

$$\dot{m}_{\text{air}} = (1,22 \times Q_{\text{nyata}}) / 3600 = 0,65 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Kinerja} &= \frac{\dot{m}_{\text{bahan}}}{Q} = \frac{\dot{m}_{\text{bahan}}}{\dot{m}_{\text{udara}} \cdot c_p \cdot \Delta T} \\ &= \frac{0,000167}{0,65 \times 1,005 \times (100 - 48)} = 0,0000536 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \right) \end{aligned}$$

##### b. Tahapan Perhitungan Kinerja Simulasi

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

- **Parameter Kinerja Perancangan**

- $V_{\text{udara}}$  (Kecepatan udara masuk) = 22.3665863 (m/s)
- $T_{\text{in}}$  (Suhu udara masuk) = 50 ( $^\circ\text{C}$ )
- $H_1$  (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 (°C)
- Kecepatan bahan masuk =  $V_{\text{bahan}}$  (m/s)
- Sudut Nozzle = 13°
- $\dot{m}_{\text{bahan}}$  (Laju bahan masuk) = 0.0001667 (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:

$$\begin{aligned} \text{➤ Kinerja} &= \frac{\dot{m}_{\text{bahan}}}{Q} = \frac{0.000167}{1.47} \\ &= 0,000112 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \right) \end{aligned}$$

### III.3.2 Bahan uji sari belimbing

Parameter perhitungan yang diambil:

$$T_{\text{out}} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

$$Q_{\text{nyata}} = 177,33 \text{ m}^3/\text{jam}$$

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

$$\text{Flow bahan} = 0.134381 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = (1.22 \times Q_{\text{nyata}}) / 3600 = 0.06 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Kinerja} &= \frac{\dot{m}_{\text{bahan}}}{Q} = \frac{\dot{m}_{\text{bahan}}}{\dot{m}_{\text{udara}} c_p \Delta T} \\ &= \frac{0,06 \times 1.005 \times (100 - 28)}{0,00023} = 0,0000536 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \right) \end{aligned}$$

### III.4 Perhitungan Energi

#### Daya Heater

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

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

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

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

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

Humidity Ratio = H (kg air/kg udara)

Humid heat (Hs) =  $0.24 + 0.45H$  (kkal/kg °C)

$$\text{Daya Heater} = \frac{m_{\text{air}} \cdot (T_{\text{db2}} - T_{\text{db1}}) \cdot H_s}{v_p} \quad (\text{kW})$$

### Kalor untuk Menguapkan

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

$\lambda$  = kalor laten penguapan (kJ/kg)

### Total Energi untuk Udara

Total Energi = Daya Heater + Kalor Penguapan (kW)

### Daya Heater dengan menggunakan bahan uji air:

Suhu dry bulb = 28 (°C)

RH udara masuk = 78,62 (%)

Dipanaskan hingga = 60 (°C)

Laju aliran udara = 0,046 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)

Humid volume = 0,878 (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>)

Humidity Ratio = 18,8 (kg air/kg udara)

= 0,0188 (gr/kg udara)

Humid heat (Hs) =  $0.24 + 0.45H$  (kkal/kg °C)

$$\text{Daya Heater} = \frac{m_{\text{air}} \cdot (T_{\text{db2}} - T_{\text{db1}}) \cdot H_s}{v_p} \quad (\text{kW})$$

$$\frac{0,046 \cdot (60 - 28) \cdot 4,2 \times 0,248}{0,878}$$

$$= 1,2 \text{ kW}$$

### Kalor untuk Menguapkan

Kalor penguapan = laju aliran bahan  $\times \lambda$  (kW)

$$= 8,33 \cdot 10^{-3} \times 2502 \quad (\text{kW})$$

$\lambda$  = kalor laten penguapan (kJ/kg)

### Total Energi untuk Udara

$$\begin{aligned} \text{Total Energi} &= \text{Daya Heater} + \text{Kalor Penguapan} \quad (\text{kW}) \\ &= 1,2 + 0,2 \\ &= 1,4 \text{ kW} \end{aligned}$$

### Daya Heater dengan menggunakan bahan uji sari belimbing:

$$\begin{aligned} \text{Suhu dry bulb} &= 28 \quad (^\circ\text{C}) \\ \text{RH udara masuk} &= 78,62 \quad (\%) \\ \text{Dipanaskan hingga} &= 80 \quad (^\circ\text{C}) \\ \text{Laju aliran udara} &= 0,065 \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1}) \\ \text{Humid volume} &= 0,878 \quad (\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}) \\ \text{Humidity Ratio} &= 18,8 \quad (\text{kg air/kg udara}) \\ &= 0,0188 \quad (\text{gr/kg udara}) \\ \text{Humid heat (Hs)} &= 0,24 + 0,45H \quad (\text{kkal/kg } ^\circ\text{C}) \\ \text{Daya Heater} &= \frac{0,065 \cdot (80 - 28) \cdot 0,248 \cdot 4,2}{0,878} \quad (\text{kW}) \\ &= 3 \text{ kW} \end{aligned}$$

### Kalor untuk Menguapkan

$$\begin{aligned} \text{Kalor penguapan} &= \text{laju aliran bahan} \times \lambda \quad (\text{kW}) \\ &= 1,66 \times 10^{-7} \times 2502 \quad (\text{kW}) \\ &= 0,000415 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

$\lambda$  = kalor laten penguapan (kJ/kg)

### Total Energi untuk Udara

$$\begin{aligned}
 \text{Total Energi} &= \text{Daya Heater} + \text{Kalor Penguapan} \quad (\text{kW}) \\
 &= 3 + 0,00041 \\
 &= 3,0004 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

### III.5 Eksperimen Pengering Semprot

#### III.5.1 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 di ukur temperaturnya.
4. Sambungkan selang dari bejana pengukur fluida ke pompa booster dan selanjutnya ke *nozzle*.
5. Hubungkan selang bertekanan dari kompressor 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.

#### III.5.2 Prosedur Eksperimen Pengering Semprot

Dalam penelitian ini, dibutuhkan daya yang besar untuk memanaskan udara, maka pengambilan data dilakukan pada malam hari. 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.

Data yang diambil berdasarkan pengambilan data pada tanggal 25 November sampai 6 desember 2010. Di Laboratorium Perpindahan Panas Fakultas Teknik Universitas Indonesia adalah:

### III.6 Data Eksperimen

#### III.6.1 Data Eksperimen dengan bahan air

Tabel. 3.1 Data Eksperimen dengan bahan uji air

Penguujian AIR										
Pump (3 Volt) - Comp ( 1 Bar)										
Flow Udara (m <sup>3</sup> /s)	Flow Bahan (m <sup>3</sup> /s)	Flow Bahan kg/s	Keluar heater ( <sup>o</sup> C)	Dry Bulb ( <sup>o</sup> C)	Wet Bulb ( <sup>o</sup> C)	H1	H2	Laju Udara Kering(m <sup>3</sup> /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

Penguujian AIR										
Pump (3 Volt) - Comp ( 1.5 Bar)										
Konversi Satuan										
Flow Udara (m <sup>3</sup> /s)	Flow Bahan (m <sup>3</sup> /s)	Flow Bahan kg/s	Keluar heater ( <sup>o</sup> C)	Dry Bulb ( <sup>o</sup> C)	Wet Bulb ( <sup>o</sup> C)	H1	H2	Laju Udara Kering(m <sup>3</sup> /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

Penguujian AIR										
Pump (3 Volt) - Comp (2 Bar)										
Flow Udara (m <sup>3</sup> /s)	Flow Bahan (m <sup>3</sup> /s)	Flow Bahan kg/s	Keluar heater ( <sup>o</sup> C)	Dry Bulb ( <sup>o</sup> C)	Wet Bulb ( <sup>o</sup> C)	H1	H2	Laju Udara Kering (m <sup>3</sup> /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

### III.6.2 Data Eksperimen dengan bahan sari belimbing

Tabel. 3. 2. Data Eksperimen dengan bahan uji sari belimbing

**Pengujian Belimbing**

Pump (3 Volt) - Comp ( 2 Bar)

h (mm)	$\Delta P$ N/m <sup>2</sup>	v <sub>2</sub> m/s	Flow Udara (m <sup>3</sup> /s)	v (m/s)	Flow Bahan (m <sup>3</sup> /s)	Temperatur In ( <sup>0</sup> C)	Dry Bulb ( <sup>0</sup> C)	Wet Bulb ( <sup>0</sup> C)	Kondisi
16	156,96	19,64113616	0,049259969	20,52498728	1,66667E-07	100	48	31	Dry
45	441,45	32,9391867	0,08261148	34,4214501	1,66667E-07	90	45	30	Dry
82	804,42	44,46451311	0,111516999	46,4654162	1,66667E-07	80	41	31	Dry
130	1275,3	55,98585192	0,140412517	58,50521525	1,66667E-07	70	47	30	Dry
185	1814,85	66,78708355	0,167502006	69,79250231	1,66667E-07	60	49	30	Dry

**Pengujian Belimbing**

Pump (3 Volt) - Comp ( 1.5 Bar)

h (mm)	$\Delta P$	v <sub>2</sub>	Flow Udara (m <sup>3</sup> /s)	v (m/s)	Flow Bahan (m <sup>3</sup> /s)	Temperatur In ( <sup>0</sup> C)	Dry Bulb ( <sup>0</sup> C)	Wet Bulb ( <sup>0</sup> C)	Kondisi
45	441,45	32,9391867	0,043479726	18,11655269	8,33333E-08	110	63	35	Dry
85	833,85	45,270582	0,059757168	24,8988201	8,33333E-08	100	58	34	Dry
135	1324,35	57,05234493	0,075309095	31,37878971	8,33333E-08	80	45	32	Dry
185	1814,85	66,78708355	0,08815895	36,73289595	8,33333E-08	70	40	30	Dry

**BAB IV**  
**ANALISA HASIL DATA EKSPERIMEN DAN**  
**SIMULASI CFD**

**IV.1 Analisa Hasil Eksperimen dan Simulasi CFD Pengering Semprot**

**IV.1.1. Bahan Uji Air (H<sub>2</sub>O)**

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 antara lain:

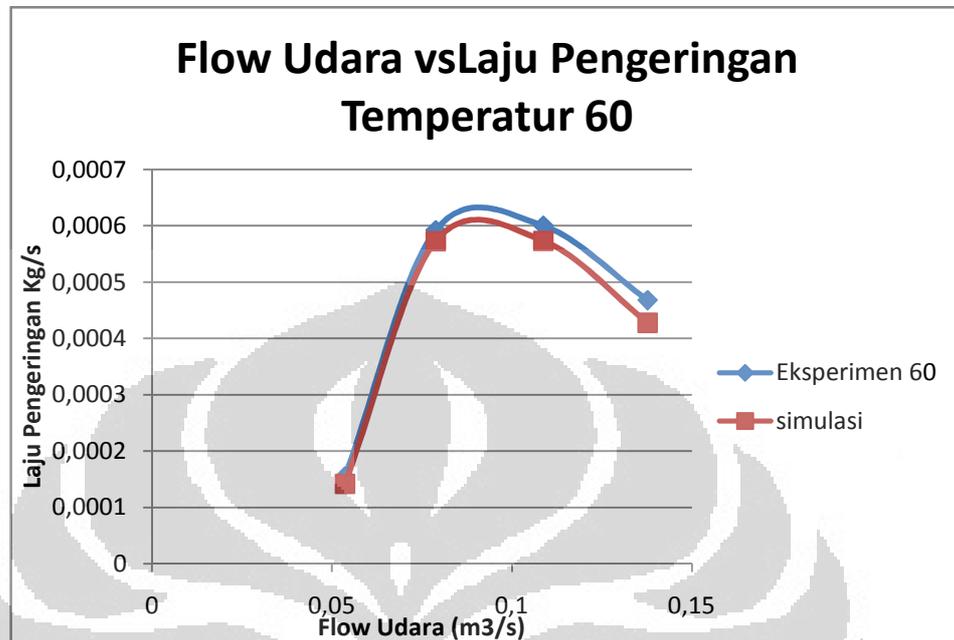
Tabel 4.1 Nilai Parameter Awal dan Kondisi Eksperimen

Parameter	Eksperimen
Diameter droplet	35 mikron
RH udara	78.627 %
Suhu Udara	40-150 °C
Flow Bahan Air	$1,67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
Flow Bahan Sari Belimbing	$1,67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
Jumlah partikel sekali semprot	50
Bahan Uji	Air dan Sari Belimbing
Tekanan udara masuk <i>nozzle</i>	2 bar

Tabel 4.2 Kinerja vs Flow udara dengan Temperatur 60<sup>0</sup>C

Flow Udara m <sup>3</sup> /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 Bahan Air Temperatur 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.

$$H_2 = \left( \frac{m_f \cdot w_f - m_p \cdot w_p}{m_{air}} \right) + H_1 \quad (4.1)$$

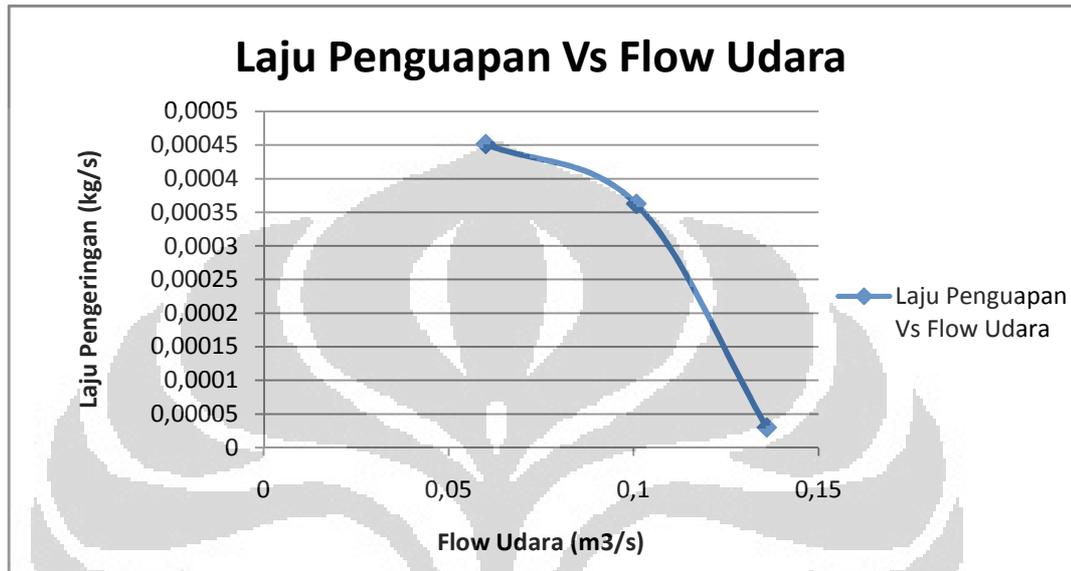
$$\text{Laju penguapan} = m_{dryair} \cdot (H_2 - H_1) \left( \frac{kg \text{ air}}{s} \right) \quad (4.2)$$

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* 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.

#### IV.1.2. Bahan Uji Sari belimbing



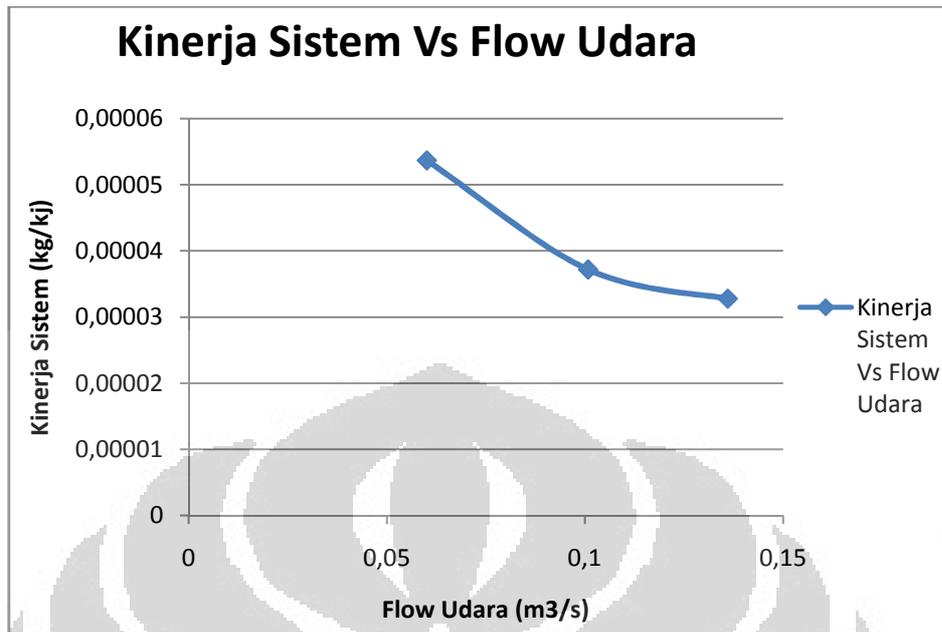
Grafik 4.2 Laju Pengeringan vs Flow Udara Bahan Sari belimbing

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 diuapkan menguapkan semakin sedikit. Menurut hasil dari grafik diatas laju penguapan maksimal akan didapat pada flow 0.13 m<sup>3</sup>/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.

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

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 kinerja sistem menjadi turun.

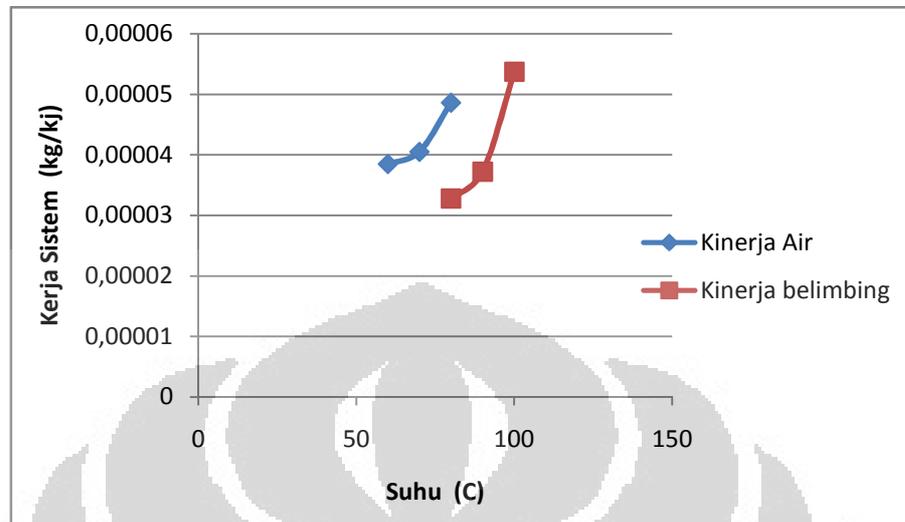
## IV.2 Kinerja Sistem



Grafik 4.3 Kinerja Sistem

Dari grafik 4.3, didapat bahwa kinerja yang terbesar pada laju aliran udara  $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$  dan kinerja yang terendah pada flow udara  $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ . 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 sari belimbing terutama untuk penggunaan pengering semprot di daerah Depok.

### IV.3 Analisa perbandingan antara kinerja sistem pada air dan sari belimbing.



Grafik 4.4 Perbandingan Kinerja Sistem Pada Air dan sari belimbing

Tabel 4.3 Perbandingan Kinerja Sistem

Suhu (C)	Kinerja (kg/kj)	Suhu (C)	Kinerja (kg/kj)
100	0,0000537	80	0,0000486
90	0,0000372	70	0,0000405
80	0,0000328	60	0,0000385

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 sari belimbing. 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 sari belimbing.

## **BAB V PENUTUP**

### **V.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 flow udara  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ , temperatur  $50 \text{ }^\circ\text{C}$
3. Kinerja terbaik sistem pengering semprot untuk belimbing didapat bahwa kinerja yang terbesar pada laju aliran udara  $6 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$  dan kinerja yang terendah pada flow udara  $1,3 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ .

### **V.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

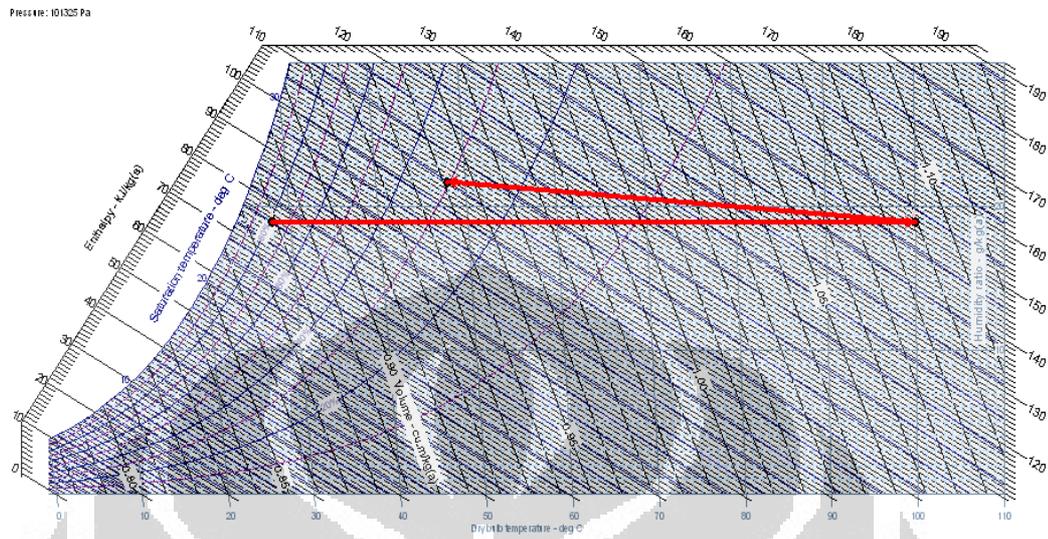
1. Alat untuk mengatur laju bahan masuk sebaiknya menggunakan pompa peristaltik untuk bahan uji sari belimbing.
2. Alat ukur suhu sebaiknya menggunakan alat ukur suhu digital sehingga kesalahan pengukuran dapat diperkecil.
3. Menggunakan kompresor sebaiknya satu unit untuk melayani satu mesin pengering semprot untuk menjaga agar tekanan yang masuk menuju nossel tetap (stabil).

## DAFTAR PUSTAKA

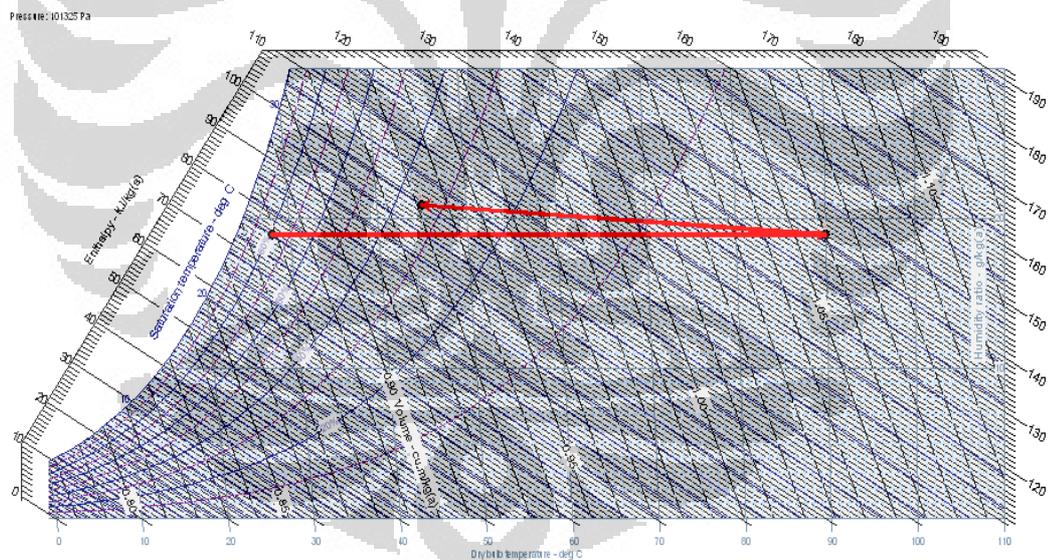
- Arun S. Mujumdar dan Sakamon Devahastin .Chapter 1: Fundamental principle of drying.
- Birchal V. S., dan Passos M. L. Brazilian Journal of Chemical Engineering. Vol. 22, No. 02, pp. 293 - 302, April - June, 2005.
- Chakraverty,A., dan D. S. De. *Post Harvest Technology of Cereals and Pulses*, Oxford and IBH Publishing Co, 1981, Chapter 2 : Psychrometry
- Iva Filkova´, Li Xin Huang, and Arun S. Mujumdar.Chapter 10: Industrial Spray Drying Systems.
- Modeling and simulation of milk emulsion drying in spray drying .
- "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).
- Supriono. (2003).Mengukur faktor faktor dalam proses pengeringan.
- Treybal, R.E., *Mass Transfer Operations*, McGraw-Hill, 1981, Chapter:Humidification and Drying.

## LAMPIRAN

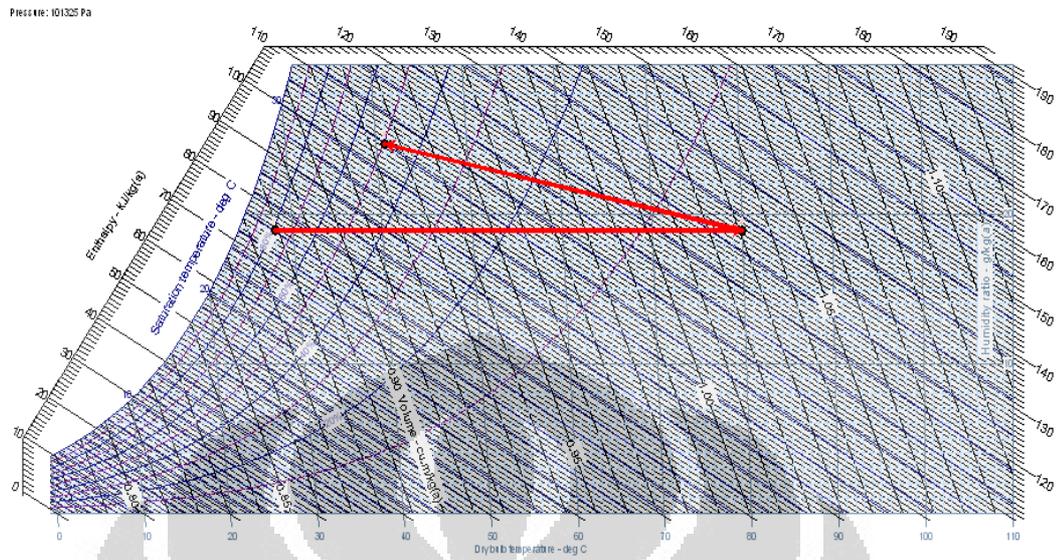
Lampiran 1. Diagram Psikometrik Udara Pada suhu 100 °C



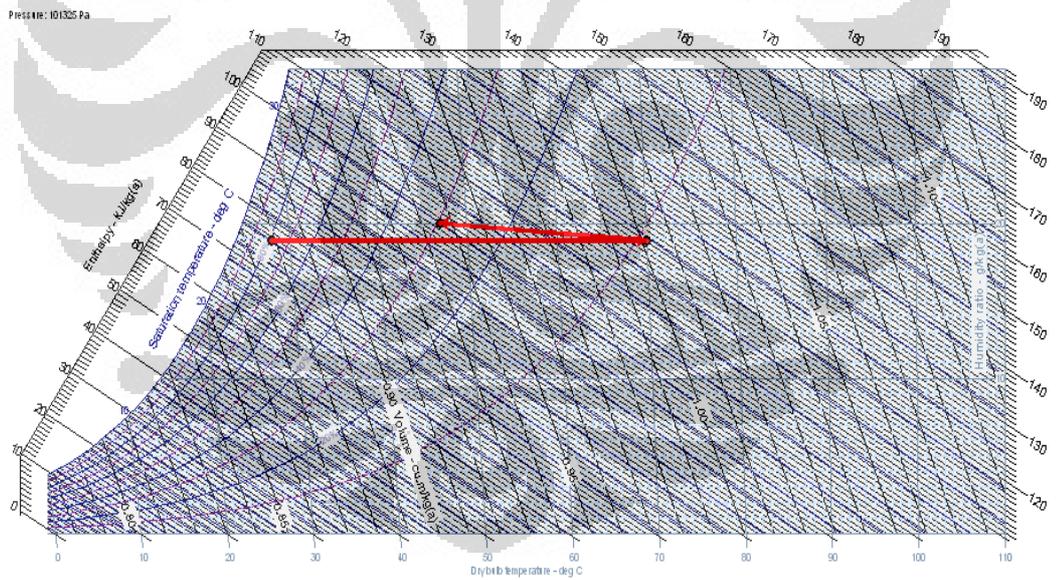
Lampiran 2. Diagram Psikometrik Udara Pada suhu 90 °C



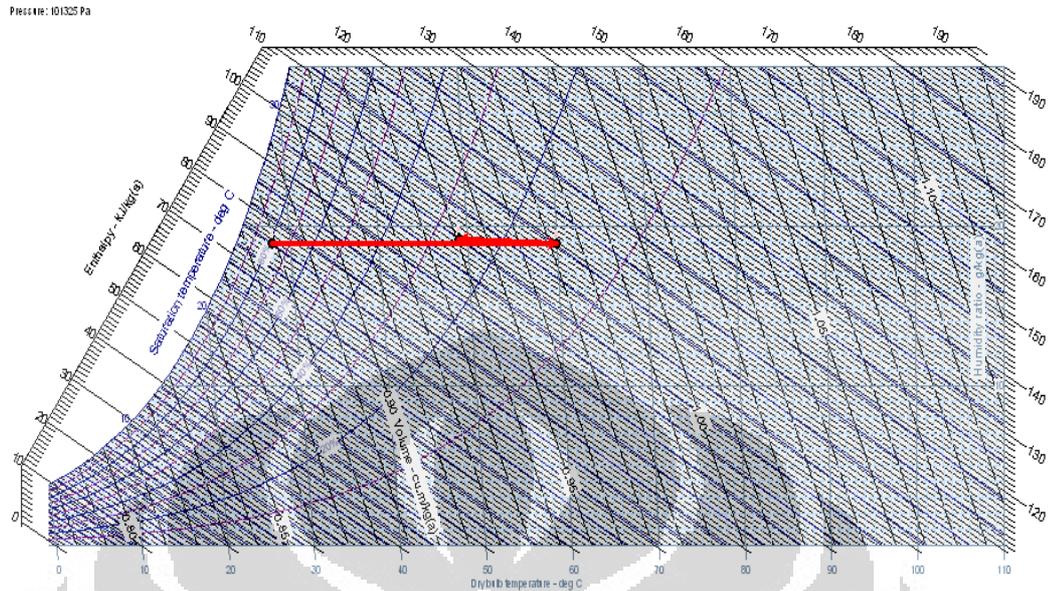
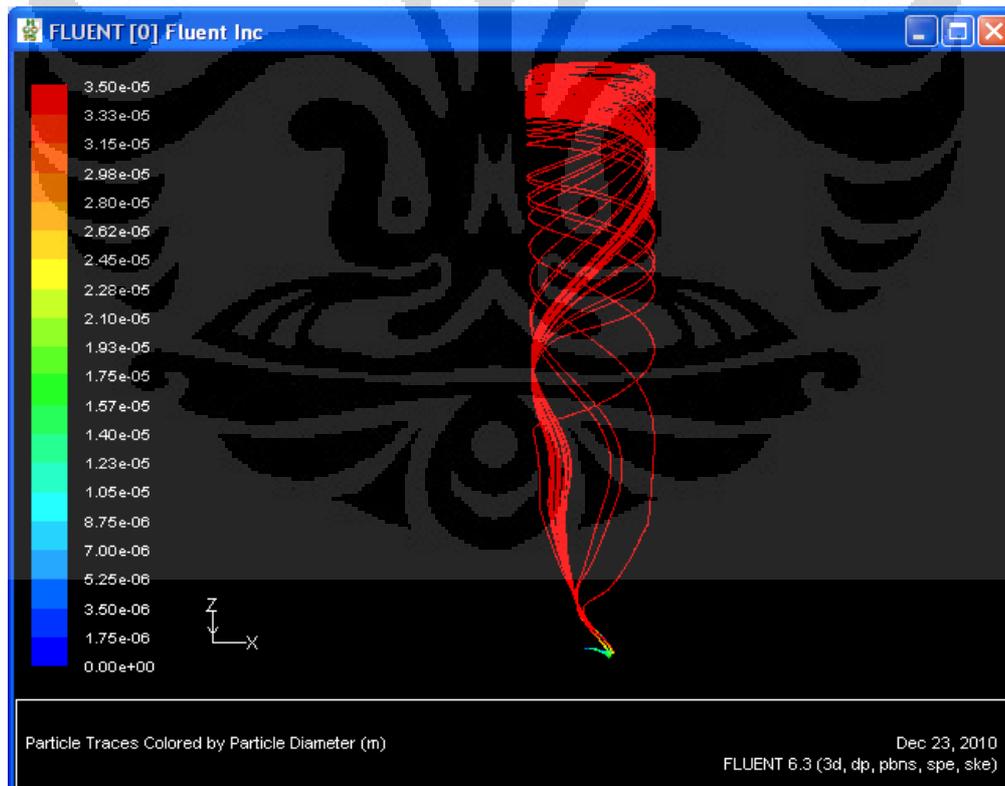
Lampiran 3. Diagram Psikometrik Udara Pada suhu 80 °C



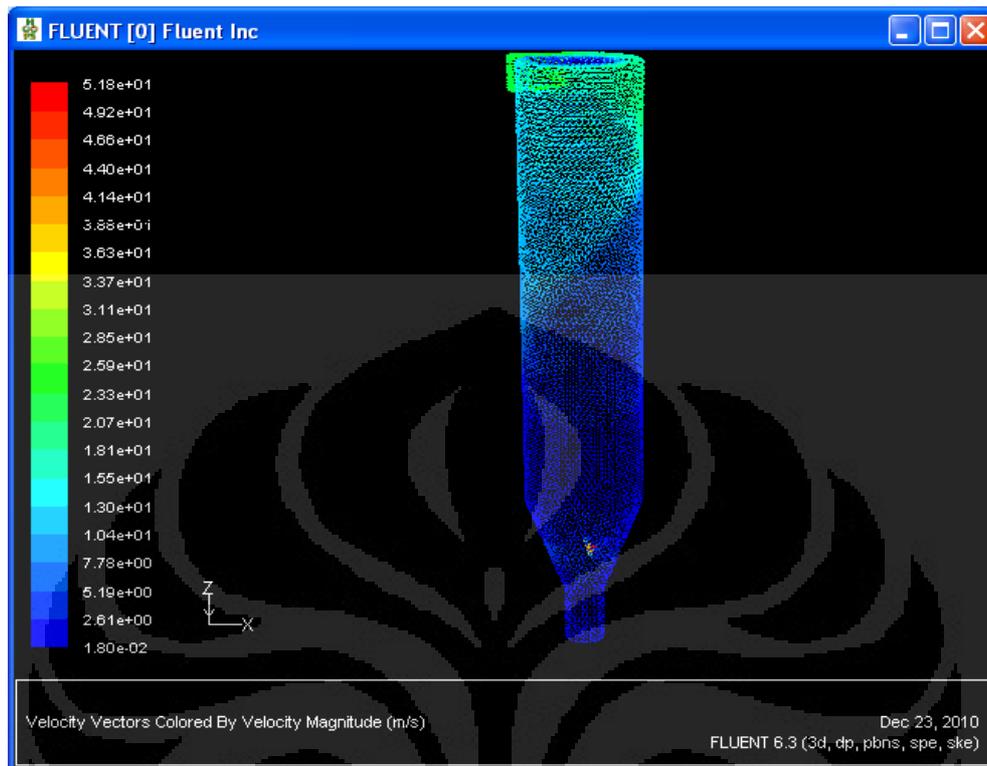
Lampiran 4. Diagram Psikometrik Udara Pada suhu 70 °C



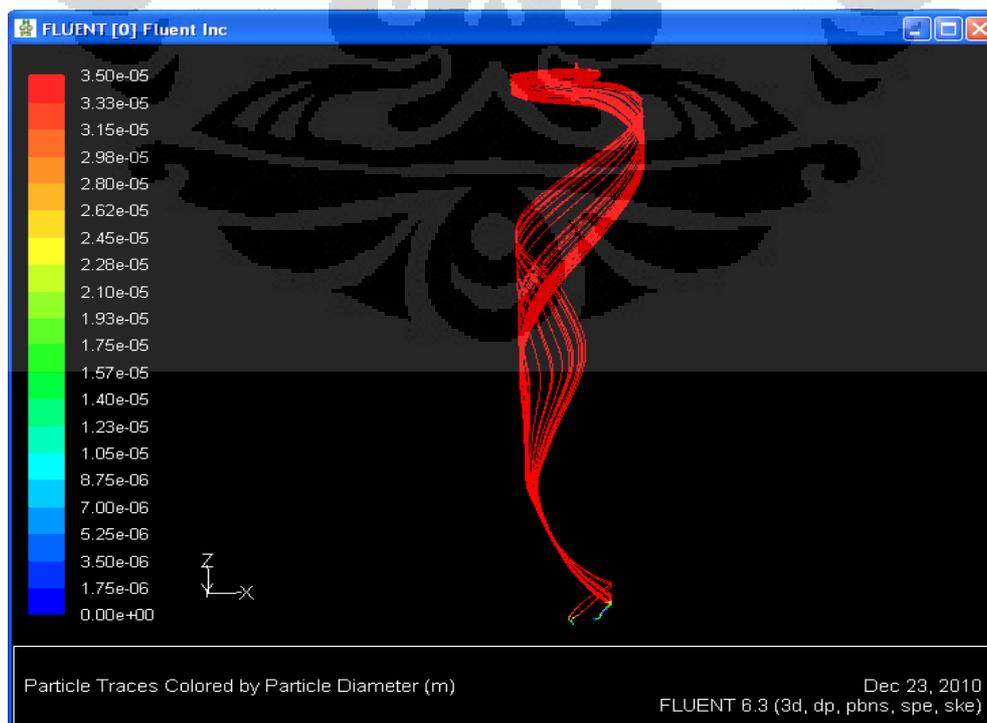
Lampiran 5. Diagram Psikometrik Udara Pada suhu 60 °C

Lampiran 6. Perubahan diameter partikel pada flow udara 193,247306 m<sup>3</sup>/jam, Temperatur 50<sup>0</sup>C

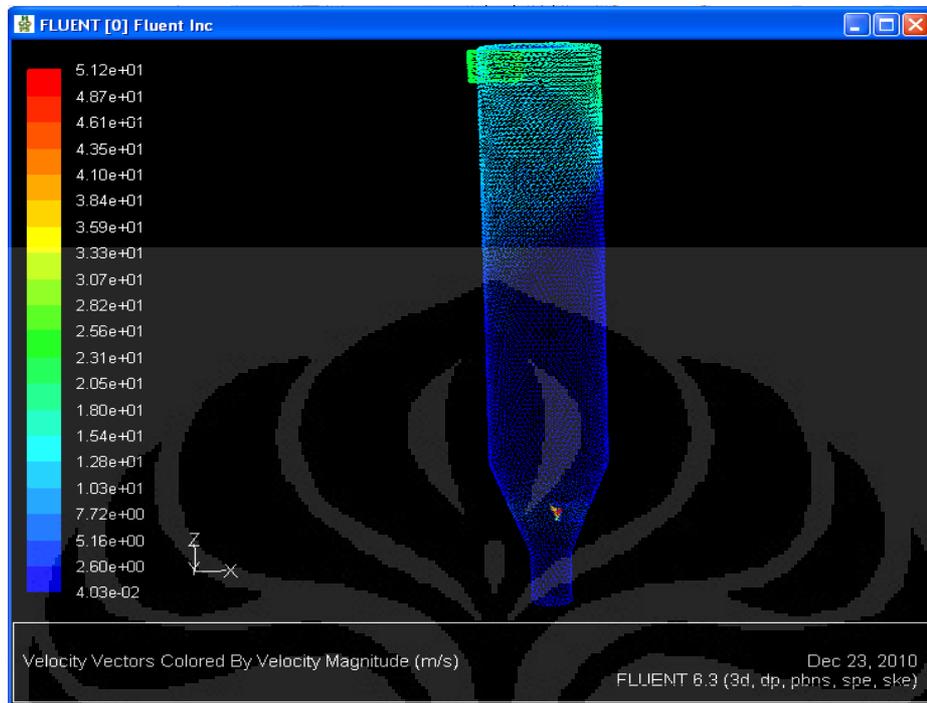
Lampiran 7. Distribusi kecepatan udara pada flow udara  $193,247306 \text{ m}^3/\text{jam}$ , Temperatur  $50^\circ\text{C}$



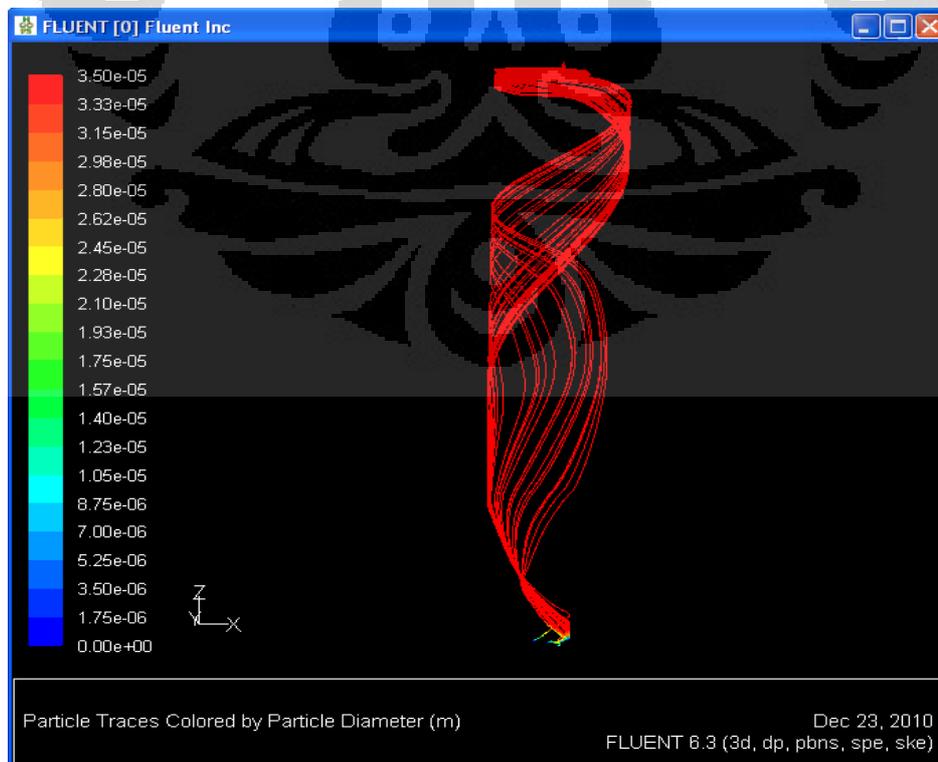
Lampiran 8. Perubahan diameter partikel pada laju Udara  $1.9 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{jam}$ , Temperatur  $60^\circ\text{C}$



Lampiran 9. Distribusi kecepatan udara pada laju Udara  $1.9 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{jam}$ ,  
Temperatur  $60^\circ\text{C}$ ]



Lampiran 10. Perubahan diameter partikel pada laju Udara  $1.9 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{jam}$ ,  
Temperatur  $70^\circ\text{C}$



Lampiran 11. Distribusi kecepatan udara pada laju Udara  $1.9 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{jam}$ ,  
Temperatur  $70^\circ\text{C}$

